

ISSN 0203-0306

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ВУЛКАНОЛОГИЯ
И
СЕЙСМОЛОГИЯ



6 · 1987

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ

Журнал основан в 1979 г.

№ 6

Выходит 6 раз в год

1987 • ноябрь—декабрь

Москва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Член-кор. АН СССР **С. А. ФЕДОТОВ** (главный редактор),
 д-р геол.-мин. наук **С. Т. БАЛЕСТА** [ответств. секретарь], д-р геол.-мин. наук
В. И. ВЛОДАВЕЦ, канд. физ.-мат. наук **А. А. ГУСЕВ**, д-р геол.-мин. наук **К. К. ЗЕЛЕНОВ**,
 д-р геол.-мин. наук **А. А. КАДИК**, д-р геол.-мин. наук **Е. К. МАРХИНИН**, д-р
 геол.-мин. наук **Ю. П. МАСУРЕНКОВ**, д-р геол.-мин. наук **С. И. НАБОКО**, д-р геол.-
 мин. наук **В. П. ПЕТРОВ**, канд. геол.-мин. наук **К. Н. РУДИЧ**, член-кор. АН СССР
Л. Н. РЫКУНОВ, член-кор. АН СССР **С. Л. СОЛОВЬЕВ**, канд. геол.-мин. наук **В. М. СУГРОБОВ**,
 канд. физ.-мат. наук **Р. З. ТАРАКАНОВ**, канд. физ.-мат. наук **П. И. ТОКАРЕВ**
 [зам. главного редактора], академик **Н. А. ШИЛО**, д-р геол.-мин. наук **В. Н. ШИЛОВ**
 [зам. главного редактора], канд. геол.-мин. наук **К. Г. ШИРИНЯН**

СОДЕРЖАНИЕ

Федотов С. А. К 25-летию детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах, XI.1961—X.1986: история, развитие и задачи	3
Федотов С. А., Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И., Гаврилов В. А., Чебров В. Н. Развитие сейсмометрических наблюдений на Камчатке	11
Федотов С. А., Шумилина Л. С., Чернышева Г. В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований	29
Горельчик В. И., Зобин В. М., Токарев П. И. Сейсмичность вулканов	61
Зобин В. М. Механизм очагов землетрясений и сейсотектоническое деформирование Камчатско-Командорского региона в 1964—1982 гг.	78
Федотов С. А., Чернышев С. Д. 20 лет долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1981—1985 гг., в целом за 1965—1985 гг. и прогноз на 1986—1990 гг.	93
Токарев П. И. Характеристики и повторяемость вулканических извержений	110
Зобин В. М., Федяков М. В. Выездная сессия МСССС на Камчатке, ноябрь, 1986 г.	119
Правила для авторов	123

VOLCANOLOGY AND SEISMOLOGY

November—December

1987 • № 6

Editor-in-Chief S. A. FEDOTOV

CONTENTS

Fedotov S. A. A Review of 25 Years of Detailed Seismic Studies in Kamchatka and Commander Islands, November 1961 — October 1986: History, Development and Tasks	3
Fedotov S. A., Feofilaktov V. D., Gordeev E. I., Gavrilov V. A., Chebrov V. N. The Development of Seismic Studies in Kamchatka	11
Fedotov S. A., Shumilina L. S., Chernysheva G. V. Seismicity of Kamchatka and Commander Islands as Derived from Detailed Studies	29
Gorel'chik V. I., Zobin V. M., Tokarev P. I. Seismicity of Volcanoes	61
Zobin V. M. Source Mechanism of Earthquakes and Seismotectonic Deformation of Kamchatka-Commander Islands Region in 1964—1982	78
Fedotov S. A. and Chernyshev S. D. Twenty Years of Long-Term Prediction for the Kuril-Kamchatka Arc: Reliability in 1981—1985, 1965—1985 and Prediction for 1986—1990	93
Tokarev P. I. Quantitative Description and Repeatability of Volcanic Eruptions	110
Zobin V. M., Fedyakov M. V. A Session of ISSCC in Kamchatka, November 1986	119

УДК 550.34

ФЕДOTOV С. А.

**К 25-ЛЕТИЮ ДЕТАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАМЧАТКЕ И КОМАНДОРСКИХ
ОСТРОВАХ, XI.1961—X.1986: ИСТОРИЯ,
РАЗВИТИЕ И ЗАДАЧИ**

A REVIEW OF TWENTY-FIVE YEARS OF DETAILED SEISMIC STUDIES OF KAMCHATKA AND COMMANDER ISLANDS, NOVEMBER 1961 — OCTOBER 1986: HISTORY, DEVELOPMENT AND TASKS, by Fedotov S. A. Kamchatka earthquakes have been studied for 250 years since October 1737. In 1737—1899 (the period covering 66% of time) macroseismic observations were carried out. In 1899—1961 (24% of time) studies were conducted predominantly at remote seismic stations. The Kamchatka regional network of seismic stations was set up on November 1, 1961 and detailed seismic studies were conducted in 1961—1987 (10% of time). The data available have been mostly obtained in the last period. The paper describes the detailed seismic studies in Kamchatka, their tasks and stages of their development. Are listed also results of fundamental and applied scientific investigations are listed also and their prospects are discussed. The main results include: detailed information on the location of the Kamchatka earthquake foci and the junction zone between Kuril-Kamchatka and Aleutian Island Arcs; a uniform catalogue of 40 000 earthquakes has been compiled for this region covering the period of 1961—1986 (one third of all USSR earthquakes occur in this area); the procedure of long — term seismic prediction and others.

(Received June 18. 1987)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

1 ноября 1986 г. исполнилось 25 лет детальным сейсмологическим исследованиям на Камчатке и Командорских островах, проводившимся Институтом вулканологии Дальневосточного научного центра АН СССР (ИВ) и Институтом физики Земли АН СССР (ИФЗ АН). Этому событию были посвящены выездная сессия Междуведомственного совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при президиуме АН СССР (МСССС) и его Дальневосточной секции, которые проходили в г. Петропавловске-Камчатском и пос. Термальный, в 60 км от него, 17—21.XI. 1986 г. [11]. Часть докладов этого совещания печатается в данном специальном выпуске журнала «Вулканология и сейсмология». Подборка статей освещает многие стороны и результаты проводившихся больших и длительных исследований, не претендуя на их исчерпывающий охват. Предпошлем статьям краткий очерк истории и задач детальным сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах.

Камчатка является северным звеном Курило-Камчатской дуги, где сейсмичность достигает почти наивысшего на Земле уровня и происходит около 1/3 землетрясений СССР. Здесь находится один из крупных тектонических узлов мира — пересечение Курило-Камчатской, Алеутской островных дуг и сейсмического пояса, протягивающегося сюда через Якутию из Северного Ледовитого океана, — и один из наиболее мощных магматических центров мира — Ключевская группа вулканов. Здесь велика опасность всех главных стихийных бедствий, вызванных подземными си-

лами,— землетрясений, цунами, извержений вулканов. В прогнозе этих явлений ведущая роль принадлежит сейсмологическим наблюдениям. При столь высокой сейсмичности совершенно необходимы научно-прикладные исследования по сейсмическому районированию, сейсмическому микрорайонированию, изучению силы и спектра колебаний при больших землетрясениях, сейсмическому прогнозу. На Камчатке могут решаться ключевые проблемы сейсмологии, геодинамики, вулканологии, важные задачи оценки сейсмической опасности и сейсмостойкого строительства. По всем этим причинам Камчатка и Командорские острова были, есть и будут одним из главных мест сейсмологических исследований в СССР.

У детальных сейсмологических исследований на Камчатке была большая и славная предыстория. Наблюдения за камчатскими землетрясениями начались с первых лет становления отечественной науки.

Начало изучению землетрясений и вулканов Камчатки было положено ее знаменитым исследователем, впоследствии членом Петербургской академии С. П. Крашенинниковым (1711—1755). Примечательно, что он был ровесником и соратником гения отечественной науки М. В. Ломоносова (1711—1765). Торжественно отмечая в 1986 г. 275-летие со дня рождения М. В. Ломоносова, научная общественность, особенно Дальнего Востока, Камчатки, не забыла о таком же юбилее его самоотверженного сподвижника.

С. П. Крашенинников был участником второй Камчатской экспедиции (1733—1743), которой командовал В. Беринг. Экспедиция, называемая также Великой северной экспедицией, относится к числу самых выдающихся предприятий во всей истории географических исследований и открытий. С. П. Крашенинников, входивший в академический отряд, высадился на Камчатке в октябре 1737 г., когда здесь происходила мощная сейсмическая деятельность. 17 октября 1737 г. в Тихом океане у берегов Камчатки произошло гигантское землетрясение, которое сопровождалось цунами высотой до 60 м, изменившим вид побережья. Магнитуда землетрясения оценивается величиной 8,5 м и более. Землетрясение, следовавшие за ним огромные морские волны и новые сильные толчки описаны С. П. Крашенинниковым в его знаменитой книге «Описание земли Камчатки» [8]. Это были первые точные сведения о землетрясениях Камчатки, и таким образом, в октябре 1987 г. исполнилось 250 лет с начала наблюдений за ними.

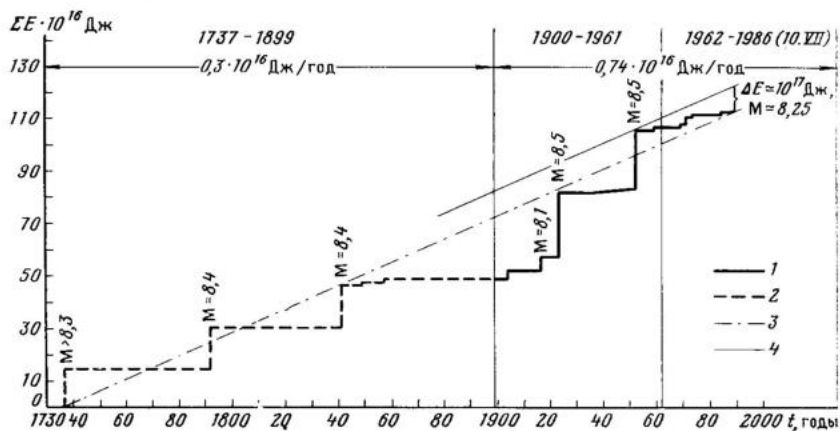
История сейсмологических наблюдений и исследований на Камчатке делится на несколько больших этапов.

С 1737 до 1899 г. длился период макросейсмических наблюдений, за который имеются достоверные сведения о 30 сильных ощутимых землетрясениях. Самые крупные из них, которые имели магнитуду $M \approx 8,4$, произошли 17.X.1737, 22.VIII.1792 и 17.V.1841 гг. [7] (рисунок). По имеющимся приближенным и неполным данным, в этот период на Камчатке в среднем в год высвобождалась сейсмическая энергия $\sim 0,3 \cdot 10^{16}$ Дж/год, что равно энергии землетрясения с $M \approx 7\frac{1}{4}$.

С 1899 г. начался период инструментальных наблюдений за землетрясениями Камчатки. До 1947 г. они велись лишь удаленными станциями. В 1915 г. в Петропавловске-Камчатском была открыта хорошо оснащенная для своего времени сейсмостанция, входившая в сеть сейсмических станций России, создававшуюся Б. Б. Голицыным. Станция, к сожалению, вела непрерывную регистрацию лишь до 1918 г. Опорная сейсмическая станция ИФЗ АН — Петропавловск — была открыта вновь только в 1951 г. [2, 19]. Возле Ключевской группы вулканов появились три станции Лаборатории вулканологии АН СССР: Ключи (1947), Козыревск (1958), Апахончич (1960), предназначенные для изучения сейсмической деятельности этих вулканов. Комплексная геолого-геофизическая обсерватория СО АН СССР (КГГО) поставила на юге Камчатки станцию Паужетка (1959), которая должна была наблюдать за районом гео-

термального месторождения. Однако все эти станции работали изолированно, и к 1960 г. камчатской региональной сети сейсмостанций еще не существовало [19].

В 1899—1960 гг. постепенно нарастало число регистрируемых камчатских землетрясений: 2—3 землетрясения в год в 1911—1923 гг., 4—5 в 1924—1950, 70—75 в 1951—1960, включая большое число афтершоков камчатского землетрясения 4(5).XI.1952 г. Был выполнен ряд важных исследований, среди которых отметим изучение последствий землетрясения и катастрофического цунами 4(5).XI.1952 [9], а также наблюдения за сейсмической деятельностью, сопровождавшей пробуждение и направленный взрыв вулкана Безымянного в 1955—1956 гг. [13] и др. Однако



Кумулятивный график сейсмической энергии $\Sigma E(t) \cdot 10^{16}$ Дж, высвободившейся в очагах камчатских землетрясений с $M \geq 7$ и глубиной очага 0—100 км за 1737—1986 гг.; 1 — график для периода инструментальных наблюдений; 2 — график времен макросейсмических наблюдений; 3 — средний график $\Sigma E(t)$; 4 — приближенная оценка верхнего предела $\Sigma E(t)$

в целом к 1960 г. ни уровень регистрации, ни в особенности низкая точность определения координат эпицентров и глубин не удовлетворяли требованиям времени. Задача резкого улучшения наблюдений за землетрясениями Камчатки и Командорских островов, создания региональной сети сейсмостанций была решена в 1960—1961 гг. с началом детальных сейсмологических исследований в этой части Курило-Камчатской дуги.

Организация детальных сейсмологических исследований на Камчатке была тем событием, в котором сочетались насущные практические потребности общества, ход развития науки и стечение обстоятельств.

4(5).V.1959 г. в Петропавловске-Камчатском было землетрясение, имевшее здесь в среднем силу 7—8 баллов. Балл землетрясения очень зависел от грунтово-геологических условий. Сейсмологам, архитекторам и проектировщикам, Камчатскому облисполкому стало ясно, что необходимо ставить работы, которые дали бы карту сейсмического микрорайонирования города и уточнили сейсмическое районирование.

В 1957 г., после создания Сибирского отделения АН СССР (СО АН), началось ускоренное развитие науки на Дальнем Востоке, в том числе на Камчатке. Открылась Камчатская геолого-геофизическая обсерватория СО АН, в которой стали получать поддержку сейсмологические исследования.

В 1956—1958 гг. на Дальнем Востоке СССР проводились большие комплексные работы по программе Международного геофизического года (МГГ). Они дали начало многим направлениям геофизических исследований на Дальнем Востоке, в том числе детальным сейсмологическим исследованиям [14].

Детальные сейсмологические исследования в Курило-Камчатской области, наиболее сейсмичном регионе СССР, начались в 1957 г. на Южных Курильских островах. В программу входило изучение сейсмичности островной дуги, ее глубинного строения, свойств земной коры и верхней мантии, механизма глубинных процессов. Южнокурильская сеть станций была организована Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) Института физики Земли (ИФЗ) АН СССР совместно с Лабораторией сейсмологии Сахалинского КНИИ (СахКНИИ) СО АН СССР. 1 января 1958 г. пять короткопериодных станций начали регистрацию на о-ве Итуруп, а летом 1958 г. на островах Шикотан и Кунашир. Совместные наблюдения ТСЭ и СахКНИИ продолжались в 1958—1963 гг. Руководили работами начальник ТСЭ С. А. Федотов и сотрудник СахКНИИ Р. З. Тараканов. Главными результатами были разработка методики детальных сейсмологических наблюдений и первые точные данные о размещении гипоцентров Курило-Камчатской островной дуги, обнаружение области пониженных скоростей в мантии под ней, подробные данные о форшоках и мощном рое афтершоков Итурупского землетрясения 6(7) ноября 1958 г. с $M=8,2$ (С. А. Федотов, А. М. Багдасарова, И. П. Кузин, Р. З. Тараканов) [18].

В 1959 г. стало ясно, что для получения более подробных сведений о глубинных процессах в области Курило-Камчатской дуги необходимы аналогичные исследования в ее северном звене — на Камчатке. В 1960 г. начальник ТСЭ С. А. Федотов и директор Камчатской геолого-геофизической обсерватории (КГГО) СО АН СССР Б. И. Пийп договорились об организации детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. Программа работ была расширена — в нее добавились сейсмическое районирование Камчатки, сейсмическое районирование г. Петропавловска-Камчатского и изучение связи сейсмичности с вулканизмом.

Летом — осенью 1961 г. ТСЭ и КГГО поставили на Камчатке четыре новые региональные сейсмостанции, переоборудовали станцию на Паужетке и 1.XI.1961 г. сеть из пяти региональных сейсмостанций ТСЭ и КГГО — станции Паужетка, Усть-Большерецк, Тополово, Петропавловск, Семячик начали свои непрерывные наблюдения по методике ТСЭ. Тем самым было положено начало детальным сейсмологическим исследованиям Камчатки и Командорских островов, которые длятся с тех пор уже четверть века.

Летом — осенью 1962 г. были пущены региональные станции в Мильково и важные по своему положению станция Шипунский, находящаяся над тихоокеанской фокальной зоной, и станция Беринг в с. Никольском на Командорских островах. В конце 1962 г., после образования Института вулканологии (ИВ) СО АН СССР, в сеть вошли также станции Ключи, Козыревск и Апахончич прежней Лаборатории вулканологии АН СССР. Тем самым завершилось создание основы камчатской региональной сети. В конце 1962 г. в сети было десять сейсмостанций, восемь из них ведут непрерывные наблюдения с тех пор.

Совместные наблюдения ТСЭ и ИВ продолжались 11 лет до 1972 г. Это был плодотворный период, в который были получены первые точные данные о размещении гипоцентров землетрясений Камчатки и Командорских островов, разработана их энергетическая классификация (С. А. Федотов) [17], изучались закономерности, свойства мантии, связь сейсмичности с вулканизмом, существенно уточнено сейсмическое районирование Камчатки, выполнено первое сейсмическое микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского, изучены Озерновское землетрясение 22(23).XI.1969 г., $M=7,7$, $I=8$ баллов; Петропавловское землетрясение 24(25).XI.1971 г., $M=7,2$, $I=8$ баллов; Усть-Камчатское землетрясение 15.XII.1971 г., $M=7,8$, $I=7$ баллов, найдены закономерности размещения очагов сильнейших землетрясений («сейсмические бреши»), определены свойства сейсмического цикла и на их основе успешно применена мето-

дика долгосрочного сейсмического прогноза и др. Научные итоги исследований периода 1961—1972 гг. изложены в книге «Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии...» [10].

Второй период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке, охватывающий 1972—1978 гг., начался в 1972 г., после образования Дальневосточного научного центра (ДВНЦ) АН СССР и укрепления научных учреждений на Дальнем Востоке. В 1972 г. сейсмостанции и большинство сотрудников ТСЭ перешли в Институт вулканологии ДВНЦ. Работы расширились. В 1972—1974 гг. их стали вести три лаборатории ИВ и одна лаборатория ИФЗ АН СССР, продолжавшая изучение закономерностей сейсмичности и задач сейсмического прогноза. В эти годы помимо продолжения прежних исследований повысился уровень их сейсмометрического обеспечения (В. Д. Феофилактов), началась разработка телеметрической сейсмической аппаратуры (В. А. Гаврилов), расширились работы по изучению механизма землетрясений (И. Г. Симбирева) и другие. Камчатская региональная сеть сейсмостанций все более полно регистрировала землетрясения в районе всех действующих вулканов Камчатки [13], что позволило, в частности, успешно предсказать место и время Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—1976 гг. (П. И. Токарев) и получить ключевые данные о его механизме (С. А. Федотов, В. И. Горельчик) [1].

В 1972—1974 гг. велся пробный краткосрочный прогноз камчатских землетрясений на неделю вперед (С. А. Федотов, А. А. Гусев, Г. А. Соболев, Л. Б. Славина). Исследовались текущие данные о сейсмичности, V_p/V_s , электротеллурических аномалиях. Результаты были обнадеживающими.

Третий период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке, продолжающийся с 1978 г. до настоящего времени, наступил после того, как в 1978 г. вышли постановления об усилении работ по прогнозу землетрясений и вулканических извержений. Была организована опытно-методическая сейсмологическая партия (ОМСП) Института вулканологии ДВНЦ (начальник Е. И. Гордеев). Вновь произошли рост и усиление детальных сейсмологических исследований.

К 1986 г. улучшились оборудование и обслуживание Камчатской региональной сети сейсмостанций, были укреплены аппаратурные группы телеметрии (В. А. Гаврилов), автоматических сейсмических станций (В. Н. Чебров), автоматизации, производства и обработки наблюдений. Окончательно вошло в рутину определение гипоцентров на ЭВМ (А. А. Гусев). Стали использоваться ЭВМ ЕС-1033, СМ-3, СМ-4 и другая вычислительная техника. Кроме ОМСП была создана Лаборатория вычислительной техники и автоматизации с ВЦ (М. Н. Никольский) и Лаборатория сейсмического прогноза (А. А. Гусев). Работы по наблюдениям с донными сейсмографами, столь необходимые на Камчатке из-за одностороннего расположения сейсмостанций по отношению к тихоокеанской фокальной зоне, ведутся в Лаборатории сеймики морского дна (В. Д. Феофилактов). Слежением за вулканическими землетрясениями и предсказанием извержений продолжает заниматься Лаборатория прогноза и механизма извержений (П. И. Токарев). Свои совместные работы с ИВ продолжала приемница ТСЭ — Лаборатория 701 ИФЗ АН СССР, которая вела изучение закономерностей сейсмичности, разработку долгосрочного сейсмического прогноза и уточнение сейсмического районирования Камчатки (С. А. Федотов, Л. С. Шумилина).

В 1986 г. в Камчатской региональной сети работали, включая телеметрические пункты, 24 станции. Число сотрудников, участвующих в проведении детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке, увеличилось с 50 в 1962 г. до 140 в 1986 г.

В 1979—1986 гг. шире развернулись также другие виды наблюдений за землетрясениями и сопутствующими им явлениями. Важные наблю-

дения за деформациями на тихоокеанском побережье Камчатки продолжали Геодезическая лаборатория ИВ (М. А. Магуськин), Лаборатория геодезии ИФЗ АН СССР (В. Б. Энман) и Хабаровское предприятие Главного управления геодезии и картографии — ГУГК (Ю. П. Никитенко). Лаборатория гидрогеологии и геотермии ИВ (В. М. Сугробов) наблюдает за гидрогеологическими и геотермическими явлениями, которые сопровождают сейсмическую деятельность. Геофизическая экспедиция ПГО «Камчатгеология» ведет работы по сейсмическому просвечиванию, наблюдения за вариациями магнитного поля, повторные наблюдения методом МТЗ, изучает сейсмичность района г. Петропавловска-Камчатского (А. П. Нетесов и др.).

В 1979—1986 гг. в ходе детальных сейсмологических исследований было выполнено много успешных работ.

Проведены полевые сейсмологические и точные геодезические исследования в эпицентральной области землетрясений 17.VIII.1983 г., $M=6,9$ и 28.XII.1984 г., $M=7,5$, происшедших в районе Камчатского залива (Е. И. Гордеев, А. П. Кириенко, Н. А. Жаринов и др.). Наблюдения проводились до и после главных толчков. Это оказалось возможным благодаря тому, что имелись верные долгосрочный и среднесрочный прогнозы.

На основе данных детальных наблюдений 1962—1981 гг. исследованы геометрия тихоокеанской сейсмофокальной зоны Камчатки, размещение гипоцентров в ней и ее связь с вулканизмом (С. А. Федотов, А. А. Гусев, Г. В. Чернышева, Л. С. Шумилина).

Точно предсказан побочный прорыв Ключевского вулкана в 1983 г. (П. И. Токарев).

Разрабатывалась методика сейсмического прогноза, сочетающая долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный прогнозы (С. А. Федотов, А. А. Гусев и др.).

Быстрое развитие детальных сейсмологических наблюдений и региональной сейсмологии на Камчатке в 1979—1985 гг. было несколько неравномерным. Внутренний технический рост не сопровождался соответствующим продвижением исследований по всем главным направлениям, как это было в 1961—1972 гг. В частности, почти прекратились работы по изучению глубинного строения сейсмологическими методами. Такое положение несложно поправить в близком будущем, используя новые возможности объединенных наблюдений постоянных, телеметрических и автоматических станций.

Данные о землетрясениях всех 25 лет детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах хранятся в полном архиве сейсмограмм и имеются в сводном каталоге землетрясений Камчатки 1961—1986 гг. Каталог содержит основные данные более чем о 40 000 землетрясений с определенными гипоцентрами. Все годы сохранялись частотная характеристика аппаратуры, положение основных станций, методика обработки, так что каталог всех 25 лет достаточно однороден. Каталог содержит сведения примерно о трети землетрясений СССР, которые происходят на Камчатке и Командорских островах, превосходит по полноте каталог землетрясений Японии за те же 1961—1986 гг. и является одним из фундаментальных результатов детальных сейсмологических исследований на Камчатке. В разные годы текущей обработкой данных наблюдений и составлением каталога руководили И. П. Кузин, А. М. Багдасарова, А. М. Кондратенко, А. А. Годзиковская, В. М. Зобин и др. Каталог готовится к печати.

С. А. Федотову довелось быть организатором детальных сейсмологических исследований на Камчатке и их научным руководителем на протяжении всех прошедших 25 лет. Хотелось бы с благодарностью отметить по крайней мере десятки имен среди сотен тех сотрудников — наблюдателей, инженеров, технических работников и научных сотрудников, которые участвовали в исследованиях в 1961—1986 гг. Достижения

этих лет являются плодом очень большого общего труда. В этом очерке ограничимся тем, что назовем некоторых наиболее заслуженных участников работ. Это П. И. Токарев, И. П. Кузин, А. М. Багдасарова, Т. С. Лепская, В. М. Зобин, А. А. Гусев, Е. И. Гордеев.

Многие итоги детальных сейсмологических исследований на Камчатке, Курильских и Командорских островах приведены в монографиях и сборниках статей [10—12; 17; 18], а также в ежегодных статьях в сборниках «Землетрясения в СССР» за 1962—1986 гг. [6].

Отметим ряд наиболее крупных научно-прикладных работ 1961—1986 гг.

В 1961—1963 гг. была усовершенствована методика сейсмического микрорайонирования и на ее основе составлена первая карта сейсмического микрорайонирования г. Петропавловска-Камчатского [5].

В 1963—1965 гг. была разработана методика долгосрочного сейсмического прогноза [15, 16].

Дважды уточнялось сейсмическое районирование Камчатки [3, 4].

В 1975—1977 гг. были проведены изыскания и даны заключения, которые предотвратили рискованное сооружение атомной электростанции на Камчатке. Площадка АЭС была выбрана неудачным образом и оказалась на плохих грунтах, где сила землетрясения могла достигать десяти и более баллов.

В 1985—1986 гг. были подготовлены предложения о необходимости укрепления зданий в районе Петропавловска-Камчатского, прочность которых ниже той, которая требуется для Камчатки по современным строительным нормам и правилам. Предложения были приняты. Появилась возможность заблаговременно предотвратить или уменьшить ущерб от сильных землетрясений, которые со временем неизбежно произойдут на Камчатке. Заканчивая очерк, остановимся на перспективах и задачах дальнейших исследований.

Как наглядно показывает рисунок, из 250 лет наблюдений за землетрясениями Камчатки, 66% времени приходится на первый, доинструментальный период 1737—1899 гг., 24% времени на период 1899—1961 гг., когда инструментальные наблюдения велись главным образом удаленными станциями, и 10% времени на детальные сейсмологические исследования на Камчатке с XI.1961 до 1987 г. К нашим дням период детальных исследований стал значительным даже по своей продолжительности. В этот последний период количество собранных данных наблюдений и исследований во много десятков раз превысило то, что было сделано за все предшествующие годы. Создание камчатской региональной сети сейсмостанций и начало детальных сейсмологических исследований оказались вехой в развитии сейсмологии на Камчатке и Дальнем Востоке СССР. Есть основания ожидать, что детальные сейсмологические исследования на Камчатке и Командорских островах будут так же быстро развиваться в последующие годы, как в свои первые 25 лет.

Общей особенностью работ грядущих лет может быть то, что в значительно большей мере придется заниматься изучением сильных землетрясений. Ход суммарного графика высвободившейся сейсмической энергии (см. рисунок) показывает, что 1961—1986 гг. были временем относительно спокойным, когда выделение сейсмической энергии было ниже среднего. К 1987 г. могла накопиться энергия, которая достаточна для землетрясения с $M \geq 8,25$ или нескольких землетрясений с $M \approx 8$. Они могут сменить спокойный период.

Перечислим ряд задач дальнейших работ.

Продолжение 25-летнего однородного ряда наблюдений по той же методике, ценность которых будет возрастать со временем.

Развитие сети и техники наблюдений, включая телеметрию, автоматические и донные станции и обработку данных всех станций в реальном времени.

Изучение строения и свойств среды, связей сейсмичности с геодинамикой и вулканизмом, природы глубинных процессов в области островных дуг.

Изучение закономерностей сейсмичности, механизма землетрясений; оценка сейсмической опасности, включая долгосрочный, средне- и краткосрочный прогнозы сильных землетрясений, и предсказание вулканических извержений.

Большинство этих задач не решается с нужной детальностью и точностью без данных наблюдений региональной сети сейсмостанций. Планируемые глобальные сети сейсмических наблюдений не замнут детальных сейсмологических исследований, но их сочетание способно открыть новые перспективы.

Итак, детальные сейсмологические наблюдения на Камчатке вступили в свое второе двадцатипятилетие. Хочется пожелать больших достижений тем сотрудникам, которые будут продолжать эти исследования в конце нашего века и в уже не таком далеком следующем веке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975—1976. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Викулин А. В., Синельникова Л. Г. Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке (к 70-летию сейсмостанции «Петропавловск») // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102—106.
3. Горячев А. В., Кириллов Ф. А., Кондорская Н. В., Ландырева Н. С., Федотов С. А. Камчатка и Командорские острова // Сейсмическое районирование СССР. Гл. 17. М.: Наука, 1968. С. 408—433.
4. Гусев А. А., Кондратенко А. М., Потапова О. В., Федотов С. А., Шумилина Л. С. Камчатка и Командорские острова // Сейсмическое районирование территории СССР. Гл. 31. М.: Наука, 1980. С. 269—283.
5. Еришов И. А., Медведев С. В., Федотов С. А., Штейнберг В. В. Сейсмическое микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского // Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. М.: Наука, 1965. № 36 (203). С. 3—33.
6. Землетрясения в СССР (ежегодники за 1962—1986 гг.). М.: Наука.
7. Кондратенко А. М., Потапова О. В., Федотов С. А., Шумилина Л. С. Камчатка // Новый каталог землетрясений в СССР с древнейших времен до 1975 г. Гл. X. М.: Наука, 1977. С. 426—447.
8. Крашенинников С. П. Описание Земли Камчатки. Изд. 4-е с приложением рапортов, донесений, других неопубликованных материалов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 251 с.
9. Саваренский Е. Ф., Тищенко В. Г., Святловский А. Е., Добровольский А. Д., Живаго А. В. Цунами 4—5 ноября 1952 г. // Бюл. Совета по сейсмологии. 1958. № 4.
10. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке // Отв. ред. Федотов С. А. Новосибирск: Наука, 1974. 220 с.
11. Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. Тезисы докладов выездной сессии МСССС и VI научной сессии Дальневосточной секции МССССС // Петропавловск-Камчатский: Изд-во МССССС и Ин-та вулканологии ДВНЦ. 1986. 254 с.
12. Сильные камчатские землетрясения 1971 года // Отв. ред. Федотов С. А. Владивосток: Изд-во Ин-та вулканологии ДВНЦ АН СССР, 1975. 159 с.
13. Токарев П. И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
14. Федотов С. А. Сейсмологические исследования Тихоокеанской экспедиции Института физики Земли АН СССР в 1957—1963 гг. // Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. М.: Наука, 1965. № 26 (203). С. 61—65.
15. Федотов С. А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Тр. Ин-та физики Земли. М.: Наука, 1965. № 36 (203). С. 66—93.
16. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. Гл. 8. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
17. Федотов С. А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
18. Федотов С. А., Багдасарова А. М., Кузин И. П., Тараканов Р. З. Землетрясения и глубинное строение юга Курильской островной дуги. М.: Наука, 1968. 212 с. (Переведена на английский яз. за границей).
19. Федотов С. А., Шумилина Л. С. Развитие сейсмологических наблюдений на Камчатке // Проблемы современной сейсмологии. Голицынский чтения 1981. М.: Наука, 1985. С. 71—86.

УДК 550.34

ФЕДОТОВ С. А., ФЕОФИЛАКТОВ В. Д., ГОРДЕЕВ Е. И.,
ГАВРИЛОВ В. А., ЧЕБРОВ В. Н.РАЗВИТИЕ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ
НА КАМЧАТКЕ

THE DEVELOPMENT OF SEISMIC STUDIES IN KAMCHATKA, by Fedotov S. A., Feofilaktov V. D., Gordeev E. I., Gavrilov V. A., and Chebrov V. N. Detailed seismic studies in Kamchatka were initiated in November 1961. In the preceding period, observations of earthquakes in the region of Kamchatka and Commander Islands were carried out at some remote seismic stations and in 1947—1960 at a few individual seismic stations in Kamchatka. The Kamchatka regional network of seismic stations set up in 1961 made it possible to conduct reliable registration of earthquakes with energy class $K_{SI,2}^{F_{68}} \geq 10$ ($M \geq 3.6$) in the entire region and with $K_{SI,2}^{F_{68}} \geq 9$ ($M > 2.2$) in East Kamchatka. During the 25 years of observations (by 1987) a total of 40 000 earthquakes were included in the uniform catalogue. Along with the development of regional seismic stations in Kamchatka a network of stations to record large earthquakes was set up. At present there are 27 stations equipped with instruments to register events with $M=3$ and higher. Since 1971 recent methods of observations include radio-telemetry systems as well as autonomous seismic stations both portable terrestrial and ocean bottom stations. Automatic devices and computers are used for information processing. A number of important results have been obtained based on seismic data collected during 25 years. Among these results are: spatial position of the seismofocal zone, seismic zoning of Kamchatka and microzoning of Petropavlovsk-Kamchatskii, identification of regularities of the seismic cycle of large earthquakes and, on this basis, the development of methods of long term seismic prediction. Foreshock-aftershock sequences of all the large earthquakes ($M \leq 7$) that occurred in 1961—1986 were studied in detail. In recent years comprehensive investigations have exhibited a significant rise in volume and quality of seismic studies.

(Received January 28, 1987)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Сейсмометрические наблюдения на Камчатке до 1961 г.

Начало сейсмометрических наблюдений на Камчатке относится к 1915 г., когда Постоянной центральной сейсмической комиссией была организована сейсмостанция в г. Петропавловске. Эта станция, входящая в единую сеть сейсмических станций России, работала с перерывами до января 1927 г. К сожалению, материалы наблюдений сейсмостанции Петропавловск за это время утеряны. Более подробно о начале сейсмологических наблюдений на Камчатке можно найти в статьях [1, 15].

В 1951 г. была вновь организована сейсмическая станция Петропавловск, оснащенная сейсмографами Кирноса. Станция вошла в Единую систему сейсмических наблюдений (ЕССН) Советского Союза. До этого, в конце 1946 г., Лабораторией вулканологии АН СССР была организована сейсмостанция Ключи, которая в 1952 г. была оснащена сейсмографами Кирноса и Харина [9, 11]. До конца 50-х годов уровень представительной регистрации камчатских землетрясений ограничивался магниту-

дой 5,5. В 1958 г. Вулканологической станцией АН СССР была открыта третья сейсмостанция на Камчатке — в пос. Козыревск, а в 1960 г. начала работу полевая сейсмостанция Апахончич, к востоку от Ключевского вулкана [10, 11]. Уровень представительной регистрации землетрясений на Камчатке был снижен после этого до магнитуды 5. Все сейсмические станции в это время были оснащены либо сейсмографами Кирноса с собственным периодом маятников 12 с и увеличением около 1 тыс., либо сейсмографами Харина с собственным периодом маятников 1,5 с и увеличением около 5 тыс. и сейсмографами ВЭГИК с периодом маятников 0,9 с и увеличением около 7 тыс.

Создание и развитие Камчатской региональной сети сейсмических станций

1961—1971 гг. В 1961 г. Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) Института физики Земли АН СССР совместно с Камчатской геолого-геофизической обсерваторией СО АН СССР была начата организация региональной сейсмической сети на Камчатке. С 1 ноября 1961 г. начали работать региональные сейсмостанции Тополово, Паужетка, Усть-Большерецк, Петропавловск и Семячик. В 1962—1963 гг. были организованы сейсмостанции Беринг, Шипунский и Авача (рис. 1). Таким образом, к

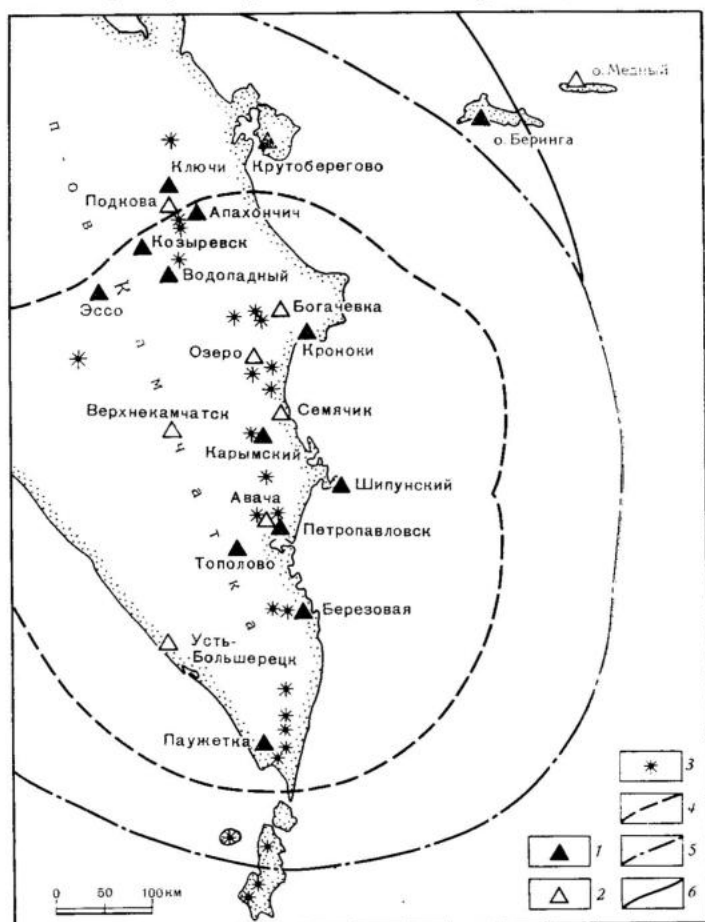


Рис. 1. Схема размещения сейсмических станций Камчатской региональной сети. 1 — действующие сейсмостанции; 2 — сейсмостанции, закрытые до 1986 г. (табл. 1); 3 — действующие вулканы; контуры надежной регистрации землетрясений с $K \geq 10$: 4 — на 1964 г.; 5 — на 1971 г.; 6 — на 1978 г.

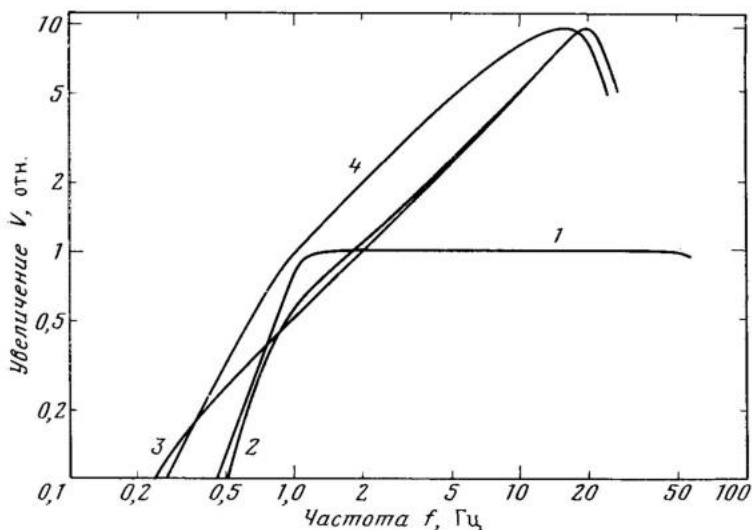


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики. 1 — сейсмографа камчатской региональной сети; 2 — сейсмометрического канала радиотелеметрической системы с сейсмометром СМЗ; 3 — то же с сейсмометром С5С; 4 — сейсмометрического канала автономной сейсмической станции

началу 1964 г. на Камчатке работало уже 11 региональных сейсмических станций. Регистрировались почти все землетрясения с энергетического класса $K_{SI,2}^{Фв8} \geq 10$ в районе Камчатки [14]. Контур надежной регистрации для землетрясений с $K \geq 10$ показан на рис. 1 [16]. В последующие годы на основании полученных результатов по сейсмичности Камчатки и Командорских островов сеть региональных станций модернизировалась, дополнялась и расширялась, но основные принципы ее организации были заложены в начале 60-х годов. Сейсмические наблюдения на Камчатке Тихоокеанская сейсмическая экспедиция начала, имея богатый опыт наблюдений сейсмичности на Южных Курильских островах, поэтому первоначально использовались методики обработки землетрясений, принятые для Южно-Курильской зоны. В частности, использовалась номограмма для энергетической классификации, полученная по наблюдениям южно-курильских землетрясений. Существенным отличием наблюдений на Камчатке было использование сейсмографа с амплитудно-частотной характеристикой, расширенной в область низких частот (сейсмограф ВЭГИК-ГБ-IV с параметрами $T_{сейсм} = 1,2$ с, $D_{сейсм} = 0,4$; $T_{гальв} = 0,075$ с, $D_{гальв} = 5,8$, коэффициент связи $\sigma \leq 0,15$; для южно-курильской сети $T_{сейсм} = 0,7$ с). Стандартная амплитудно-частотная характеристика сейсмографа Камчатской региональной сети приведена на рис. 2.

Это позволило без искажений регистрировать более удаленные землетрясения. Номограмма для энергетической классификации была перестроена для камчатских землетрясений. Создание в 1968 г. номограммы для энергетической классификации камчатских землетрясений по величине A_{max}/T в поперечных волнах было существенным событием первого десятилетия детального изучения сейсмичности Камчатки и Командорских островов [12]. Номограмма явилась основой для получения однородного каталога землетрясений. Определение эпицентров и глубин землетрясений проводилось по стандартной методике палеток изохрон, предложенной Ю. В. Ризниченко [8].

К концу первого десятилетия наблюдений сейсмичности на Камчатке, в 1971 г., региональная сеть насчитывала 15 сейсмических станций и

¹ Далее — просто К.

Параметры сейсмических станций на Камчатке

Сеймостанция	Код	Координаты		Высота над ур. мо- ря, м	Увеличение <i>T</i> , тыс.	Год открытия	Год закрытия
		ф. с. ш.	λ. в. д.				
<i>Камчатская региональная сеть</i>							
Петропавловск	PET	53,0	158,6	68	5,0	1961	—
Тополово	TOP	53,2	158,0	200	10,0	1961	—
Паужетка	PAU	51,5	156,8	110	5,0	1961	—
Усть-Большерецк	UBL	52,8	156,3	15	3,0	1961	1964
Семячик	SML	54,1	160,0	10	3,0	1961	1973
Карымский	KII	54,0	159,5	790	5,0	1974	—
Ключи	KLY	56,3	160,9	40	5,0	1961	—
Козыревск	KOZ	56,1	159,9	45	5,0	1961	—
Апахончич	APH	56,0	160,8	700	5,0	1961	—
Авача	AVH	53,3	158,7	900	5,0	1962	1976
Беринг	BKI	55,2	166,0	15	5,0	1962	—
Шипунский	SPN	53,1	160,0	170	5,0	1962	—
Богачевка	BGC	54,8	160,9	240	5,0	1964	1965
Кроноки	KRI	54,6	161,2	50	5,0	1966	—
Озеро	OZR	54,7	160,4	380	5,0	1967	1971
Эссо	ESO	55,9	158,7	490	40,0	1965	—
Верхнекамчатск	VKM	54,6	158,5	160	8,0	1966	1971
Крутоберегово	KBG	56,3	162,7	30	5,0	1968	—
Оссора	OSS	59,1	163,1	5	10,0	1973	—
Медный	MED	54,8	167,6	20	7,0	1973	1975
Водопадный	VDP	55,7	160,2	1060	10,0	1977	—
Подкова	PDK	56,1	160,8	800	5,0	1978	1984
Березовая	BER	52,3	158,5	20	5,0	1981	—
<i>Радиотелеметрические станции</i>							
Авача	AVH	53,2	158,7	900	6,0	1977	—
Корякская	KRK	53,3	156,6	1050	6,0	1977	—
Булочка	BLC	53,2	158,8	800	6,0	1977	1984
Козельский	KZL	53,3	158,8	950	6,0	1977	—
Горелый	GRL	52,6	158,1	1600	6,0	1980	—
Шивелуч	SVL	56,6	161,2	900	6,0	1980	—
Налычево	NLC	53,3	159,2	20	6,0	1985	—
Подкова	PDK	56,1	160,8	750	6,0	1985	—

Примечание. Камчатская региональная сеть включает 23 станции, радиотелеметрических станций — 5. Увеличение для периода *T* для станции Авача равно 1 с для амплитудно-частотной характеристики 2 (рис. 2).

общее число землетрясений, регистрируемых и обрабатываемых ежегодно, составляло около 1700. В каталог входили землетрясения энергетических классов $K \geq 7,5$. Состояние региональной сети и контур надежной регистрации для землетрясений с $K \geq 10$ на 1971 г. показаны на рис. 1. В табл. 1 представлены основные параметры сейсмических станций на Камчатке и Командорских островах.

До 1972 г. на основании сейсмических наблюдений на Камчатке и Командорских островах было получено детальное пространственное распределение гипоцентров землетрясений, проведено микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского и уточнено сейсмическое районирование п-ова Камчатка. Определены закономерности цикличности сильных землетрясений, и на основании этого разработана методика долгосрочного сейсмического прогноза [13]. В 1969 и 1971 гг. детально изучены форшок-афтершоковые последовательности для трех сильнейших землетрясений десятилетия (23.XI.1969 г., $M=7,7$; 25.XI.1971 г., $M=7,2$; 15.XII.1971 г., $M=7,8$) и заложены основы для развития работ по краткосрочному прогнозу сильных землетрясений [4, 5, 12—14, 17].

В этот период детальными сейсмическими исследованиями руководили начальник ТСЭ ИФЗ АН СССР С. А. Федотов и зав. Лабораторией сети геофизических станций Института вулканологии СО АН СССР П. И. Токарев.

1972—1978 гг. В 1972 г. региональные сейсмические станции ТСЭ ИФЗ АН СССР были переданы в Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, где были образованы Лаборатории сейсмометрии и сейсмологии. В Лаборатории сейсмометрии велись работы по совершенствованию, техническому переоснащению и оптимизации сейсмической сети, а в Лаборатории сейсмологии — обработка сейсмограммного материала и составление окончательного каталога. Сеть сейсмических станций за это время существенных изменений не претерпела (см. табл. 1, рис. 1). Важным результатом этого периода было переоснащение сейсмических станций типовой аппаратурой, стандартизация амплитудно-частотных характеристик сейсмических каналов и оптимизация увеличения на сейсмических станциях по результатам районирования территории Камчатки по уровню сейсмических помех [19—21]. Максимально возможное увеличение для стандартной региональной амплитудно-частотной характеристики на Камчатке составило 40 тыс. Такое увеличение было установлено на сейсмостанции Эссо в 1974 г.

К этому времени относится начало внедрения методов контрольно-калибровочных работ с применением ЭВМ. В результате этого амплитудно-частотные характеристики регионального сейсмометрического канала соответствовали стандарту с точностью не хуже 5%.

Важным условием стандартизации сейсмометрических наблюдений было создание хороших условий для установки сейсмической аппаратуры. Были построены новые здания сейсмостанций Эссо, Кроноки и Тополово. В 1977 г. в опытном порядке на сейсмостанции Эссо был установлен и ряд лет функционировал сейсмограф СКД.

Расчет координат землетрясений с 1977 г. был полностью переведен на ЭВМ по программе ГИ-77, разработанной и внедренной А. А. Гусевым [3].

Были продолжены пробные работы по краткосрочному прогнозу землетрясений, в основном на сейсмологическом материале наблюдений. С целью большей детальности наблюдений за счет освоения труднодоступных районов в 1976 г. начала работать радиотелеметрическая система сбора сейсмометрической информации. Это положило начало освоению новых автоматизированных методов наблюдений. В эти годы Лабораторией сейсмометрии заведовал В. Д. Феофилактов, Лабораторией сейсмологии — И. Г. Симбирева, научным руководителем исследований был С. А. Федотов.

1979—1986 гг. Начиная с 1979 г., в связи с правительственными постановлениями были усилены сейсмологические исследования в стране и в том числе на Камчатке. В Институте вулканологии была организована Опытно-методическая сейсмологическая партия (ОМСП), в которой были сконцентрированы все сейсмологические наблюдения, текущая обработка, развитие новых методов наблюдений и методик обработки, создание и эксплуатация радиотелеметрических систем, автоматизация сбора, обработки и хранения сейсмологической информации.

Конфигурация региональной сети сейсмических станций осталась почти неизменной (см. табл. 1 и рис. 1), и в 1986 г. насчитывала 15 региональных сейсмических станций. Кроме этого, работали две радиотелеметрические сети станций: одна в районе г. Петропавловска-Камчатского, другая в районе г. Ключи с общим числом передающих пунктов — десять. Практически неизменное строение сети региональных станций позволило за 25 лет детальных наблюдений составить однородный каталог землетрясений, включающий более 40 тыс. событий.

За 1979—1986 гг. произошло два значительных сейсмических события, оба в районе стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Землетрясения 17.VIII.1983 г. с магнитудой 6,9 и 28.XII.1984 г. с магнитудой 7,5 были детально изучены не только с помощью региональной сети, но и специально организованными локальными сетями автономных сейсмических станций [6, 7]. На ближайших пунктах наблюдений были получены записи на аппаратуре, регистрирующей сильные землетрясения.

Существующая региональная сеть сейсмических станций обеспечивает надежную регистрацию землетрясений с $K \geq 9,5$ во всей фокальной зоне в районе Камчатки и Командорских островов. Дальнейшее развитие сейсмометрических наблюдений связано как с открытием новых станций для более равномерного размещения их в исследуемой области, с созданием нескольких комплексных станций для регистрации сейсмических сигналов в длиннопериодном диапазоне, так и с развитием радиотелеметрических систем сбора сейсмологической информации путем развертывания более плотных сетей наблюдения в необитаемых районах.

Детальные сейсмологические наблюдения 1976—1986 гг. возглавлял начальник ОМСП Е. И. Гордеев, обработку данных наблюдений — В. М. Зобин, развитие радиотелеметрических систем — В. А. Гаврилов, научным руководителем исследований был С. А. Федотов.

Сеть станций для регистрации сильных землетрясений

Организация сети станций для записи сильных движений началась одновременно с формированием региональной сети. Первые комплекты аппаратуры были установлены на некоторых региональных сеймостанциях и в черте г. Петропавловска-Камчатского в 1961 г. (табл. 2, рис. 3). К сожалению, невысокая надежность используемой аппаратуры не позволила в то время организовать полноценную сеть для гарантированной регистрации движения от сильных землетрясений.

Плановое создание сети станций началось в 1974 г. В конце 70-х — начале 80-х годов сеть станций развивалась по двум направлениям: равномерное заполнение пунктами наблюдений девятибалльной зоны восточного побережья Камчатки и создание в районе г. Петропавловска-Камчатского комплексной системы наблюдений с широким частотным динамическим диапазоном регистрируемых сигналов. В 1986 г. сеть станций, регистрирующих сильные движения, состояла из 18 пунктов на восточном побережье Камчатки и девяти — в районе г. Петропавловска-Камчатского (см. табл. 2 и рис. 3). Станции сильных движений оснащены акселерографами ССРЗ и S MAC=Q, а также велосиграфами С5С-ИСО. Все станции находятся в восьми-девятибалльной зоне по карте сейсмического районирования Камчатки СР-78 [14]. Конфигурация сети и чувствительность аппаратуры позволяют в районе восточного побережья Камчатки регистрировать без пропусков землетрясения с проявлением силой от 3 баллов по шкале MSK-64.

К 1986 г. каталог землетрясений, зарегистрированных сетью станций сильных движений, составил около 100 событий, в основном выше одиннадцатого энергетического класса. Зарегистрирован ряд сильнейших землетрясений последнего десятилетия, в том числе получена запись землетрясения 28 декабря 1984 г. с $M=7,5$ на расстоянии 10 км от эпицентра. Регистрацию сильных движений в 1980—1986 гг. вел В. П. Митякин под руководством Е. И. Гордеева.

Развитие сети станций сильных движений на Камчатке и год их регистрации

Станция	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1981	1985	1986	
Беринга																											
Шипунский																											
Кроноки																											
Кругоберегово																											
Паужетка																											
м. Петропавловский																											
Паратунка																											
28-й километр																											
Жуланово																											
м. Африка																											
Ключи																											
м. Кроноцкий																											
Березовая																											
м. Круглый																											
Ходутка																											
Нальчево																											
м. Шуберга																											
14-й километр																											
Петропавловск																											
Дачная																											
Горького																											
Институт																											
Цунами																											
Ключевская																											
Дом быта																											
Телецентр																											
Мишенная																											

Примечание. К настоящему времени на Камчатке работает 27 станций сильных движений. X — станции на восточном побережье Камчатки; + — станции в г. Петропавловске-Камчатском.

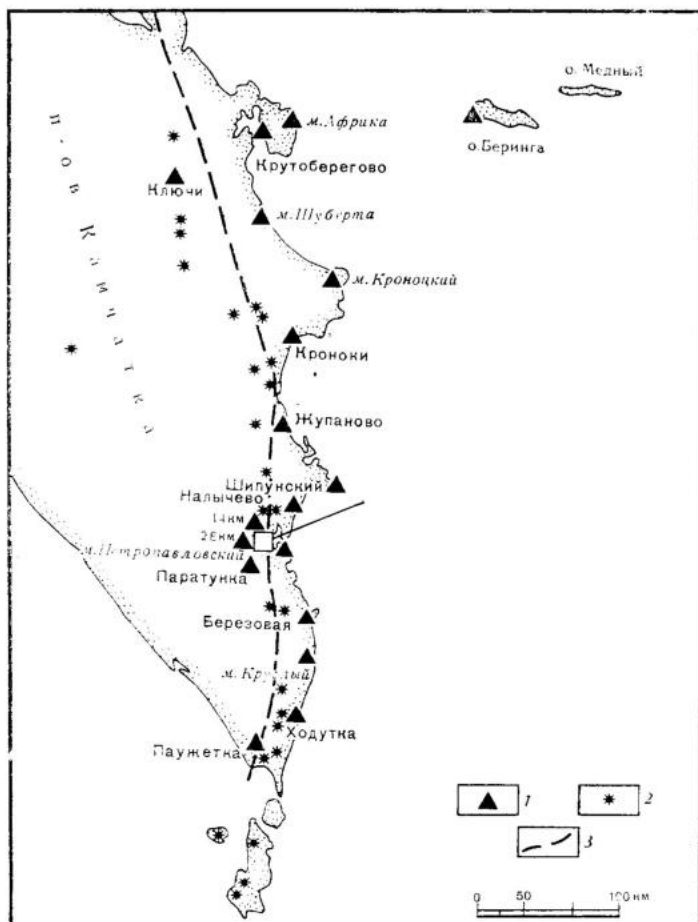


Рис. 3. Сеть станций по наблюдению за сильными землетрясениями. 1 — пункты наблюдений; 2 — действующие вулканы; 3 — граница девятибалльной зоны сотрясаемости

Локальные радиотелеметрические сети

Создание радиотелеметрических сетей в значительной степени было связано с необходимостью расширения сейсмометрических сетей в труднодоступных районах действующих вулканов, и в первую очередь в районах Авачинской и Северной групп вулканов Камчатки.

Отсутствие подходящей серийной отечественной радиотелеметрической аппаратуры потребовало при этом от Института вулканологии проведения собственных разработок, которые и были начаты в 1974 г. При этом с самого начала ставилась задача разработки и внедрения в эксплуатацию не только собственно радиотелеметрической аппаратуры, но также аппаратных и программных средств автоматизации обработки сейсмометрических данных, поступающих по каналам телеметрии, т. е. создания в итоге единой системы сбора и обработки сейсмометрической информации.

Разработанный к 1976 г. первый вариант радиотелеметрической системы — РТС ТЕСИ (Телеметрическая система), обеспечивал на каждом передающем пункте измерение вертикальной и одной горизонтальной составляющих сейсмического сигнала [2]. Передача сейсмометрических данных в Центр сбора информации осуществлялась в непрерывном режиме, регистрация данных производилась магнитографами и аппарату-

Технические характеристики радиотелеметрических систем

Техническая характеристика	ТЕСИ	ТЕСИ-2
<i>Сейсмометрические каналы</i>		
Количество каналов (для одного передающего пункта)	2	4
Полоса пропускания без сейсмометров (уровень —3 дБ)	0,5—20 Гц	0,01—40 Гц
Тип сейсмометров	СМЗ	СМЗ, С5С
Динамический диапазон на канал	54 дБ	54 дБ
Тип калибровки	Ручная МГПА	Автоматическая импульсивная МГПА
Мощность, потребляемая аппаратурой передающего пункта	0,5 Вт	0,15 Вт
<i>Каналы измерений геофизических величин</i>		
Количество каналов		До 16
Погрешность измерений		<1%
Режим измерений	Дискретный с интервалом от 15 мин до 24 ч	
Вид регистрации	Перфоратор, самописец	
<i>Радиоканал</i>		
Мощность передатчика		0,3 Вт
Потребляемая мощность передатчика		1 Вт
Ширина полосы излучения		19 кГц
Диапазон рабочих температур передатчика		-35 ÷ +40° С
Потребляемая мощность приемника	25 Вт	0,15 Вт
Дальность связи		До 100 км

рой видимой записи. Основные технические характеристики РТС ТЕСИ представлены в табл. 3. Типовые амплитудно-частотные характеристики сейсмометрических каналов РТС приведены на рис. 2. Общая для всех передающих пунктов аппаратура службы времени обеспечивала точность временной привязки не хуже 0,1 с. Калибровка сейсмометрических каналов осуществлялась во время посещения передающих пунктов с помощью магнитоэлектрического генератора МГПА.

Многолетний опыт работы РТС ТЕСИ показал достаточно высокую надежность разработанной аппаратуры: коэффициент готовности РТС можно оценить величиной 95—98%, среднее время наработки на отказ радиопередающей аппаратуры РТС составляло около 20 мес.

Разработанная к 1976 г. РТС ТЕСИ была рассчитана на эксплуатацию в течение 6—8 лет. За это время на основе опыта эксплуатации необходимо было оценить правильность выбора основных решений, разработать и подготовить к вводу в эксплуатацию новый вариант РТС. Указанная задача в основном была решена к середине 1985 г. К этому времени была разработана новая модификация системы — РТС ТЕСИ-2. Из представленных в табл. 3 основных технических характеристик обеих систем видно, что РТС ТЕСИ-2 в целом отличается от ТЕСИ существенно более высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками: четыре сейсмометрических канала вместо двух при сохранении прежнего динамического диапазона по каждому каналу; более широкая полоса пропускания каналов, регулируемая с помощью фильтров и характеристик применяемых сейсмометров; наличие встроенной аппарату-

ры автоматической импульсной калибровки; уменьшенная мощность, потребляемая аппаратурой передающего пункта, и др.

Необходимо также подчеркнуть, что при создании РТС ТЕСИ-2 была решена не только задача разработки макетных и экспериментальных образцов новой аппаратуры, но и проблема изготовления малой серии телеметрической аппаратуры в целях полного оснащения сетей Камчатки.

Одним из наиболее «узких» мест в оснащении телеметрических сетей является аппаратура регистрации сейсмометрических данных. Для регистрации данных, получаемых по каналам РТС ТЕСИ, использовалась аппаратура с прямой магнитной записью, также разработанная группой телеметрии ОМСП. Недостатки, свойственные указанному виду записи (узкий динамический диапазон, низкая точность записи, ограничение частотного диапазона снизу), не позволяли в полной мере реализовать возможность РТС и ухудшали характеристики всей системы в целом. Для решения этого вопроса работы велись одновременно по двум направлениям: создание прецизионной аппаратуры аналоговой магнитной записи с непрерывным режимом регистрации и создание аппаратуры для цифровой выборочной регистрации землетрясений в ждущем режиме. Результаты работы первого направления выразились в создании к апрелю 1986 г. комплекса аппаратуры с ЧМ-записью сейсмических данных, характеристики которого представлены ниже.

Основные характеристики комплекса:

Количество каналов	16
Частотный диапазон (уровень 0,5), Гц	0—25
Динамический диапазон, дБ	46
Уровень нелинейных искажений	<1%
Время непрерывной записи, ч	26
Мощность, потребляемая аппаратурой записи, Вт	4

В настоящее время указанная аппаратура является основным средством регистрации сейсмометрических данных, поступающих по каналам РТС.

Аппаратура для цифровой регистрации сейсмотелеметрических данных была введена в опытную эксплуатацию в составе Петропавловского центра сбора информации в декабре 1984 г. Аппаратура работает в ждущем режиме, обеспечивая выборочную регистрацию землетрясений без потери первых вступлений на ленточных накопителях типа ИЗОТ-5003. Конструктивно аппаратура выполнена в стандарте КАМАК, управление осуществляется микроЭВМ «Электроника-60».

Основные технические характеристики аппаратуры:

Число подключаемых аналоговых каналов	32
Частота аналого-цифрового преобразования на канал, Гц	64
Разрядность аналого-цифрового преобразования, бит	10+знак
Глубина буфера задержки, не менее, с	5
Емкость накопительных устройств (2 НМЛ ИЗОТ-5003), бит	2·10 ⁸ (40 землетрясений)

Магнитные ленты с записями землетрясений, получаемые аппаратурой цифровой регистрации, обрабатываются на ЭВМ СМ-4.

Работы по созданию комплекса аппаратных и программных средств машинной обработки сейсмотелеметрических данных ведутся в Институте вулканологии с 1982 г. Результаты этих работ способны в значительной степени повлиять на эффективность сейсмометрических наблюдений на базе РТС.

В настоящее время на Камчатке эксплуатируются две локальные радиотелеметрические сети: Петропавловская и Ключевская. Петропавловская радиотелеметрическая сеть состоит из семи передающих пунк-

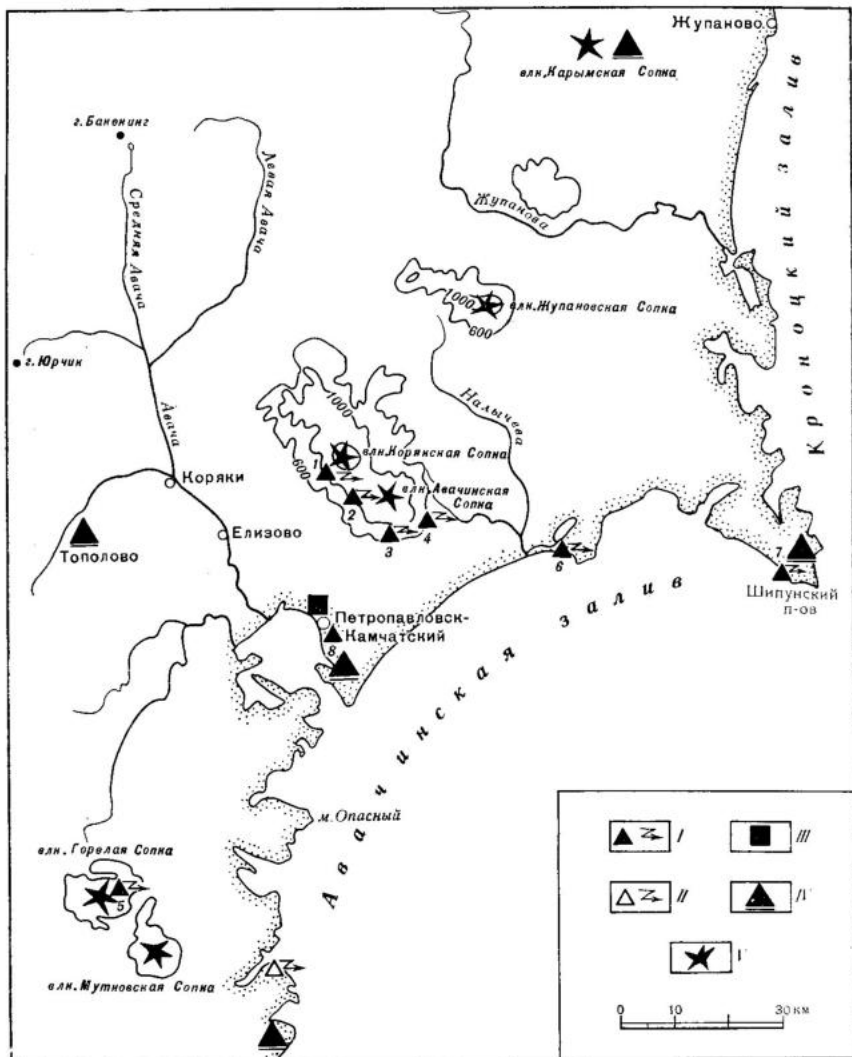


Рис. 4. Схема размещения передающих пунктов радиотелеметрической системы в районе г. Петропавловска-Камчатского. I — Корякская; 2 — Авача; 3 — Булочка; 4 — Козельский; 5 — Горелый; 6 — Налычево; 7 — Шипунский; 8 — Институт I — передающий пункт РТС (действующий); II — передающий пункт РТС (планируемый); III — центр сбора информации; IV — сеймостанции Камчатской региональной сети; V — действующие вулканы

тов, информация с которых поступает на приемный центр в Институт вулканологии, регистрируется и обрабатывается в аналоговом виде по стандартной методике и выборочно регистрируется в цифровой форме на системе накопления данных. Цифровые записи используются в опытным порядке для отладки и организации системы обработки и хранения автоматизированной системы сбора и обработки сейсмологической информации. Основная задача системы — оперативное получение цифровой информации и возможность ее широкой обработки с целью выявления и контроля предвестниковых признаков для прогноза землетрясений. Формирование Петропавловской радиотелеметрической системы сбора и обработки сейсмологической информации находится на стадии завершения, и окончательно система будет состоять из 10—12 передающих пунктов, системы аналоговой регистрации, системы накопления цифровой информации и системы обработки (рис. 4; см. табл. 1).

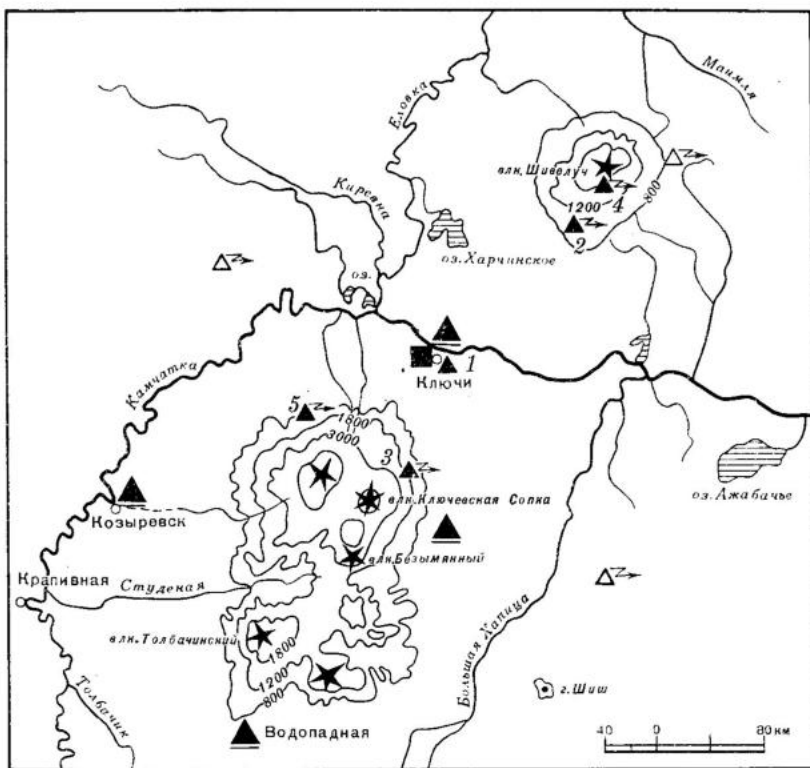


Рис. 5. Схема размещения передающих пунктов радиотелетрической системы в районе г. Ключи. 1 — Ключи; 2 — Шивелуч; 3 — Подкова; 4 — Купол; 5 — Крестовский. Остальные условные обозначения см. на рис. 4

Подобная система создается в г. Ключи для оперативного слежения за сейсмической активностью Ключевской группы вулканов (вулканы Ключевской, Шивелуч, Безымянный и Толбачик). В настоящее время там работают четыре радиотелетрических пункта, в перспективе намечается иметь 10—14 пунктов (рис. 5; см. табл. 1). С помощью существующих радиотелетрических систем ведется оперативный контроль за сейсмической обстановкой в районе г. Петропавловска-Камчатского и Ключевской группы вулканов, а также развиваются работы по поиску и контролю предвестников сильных землетрясений и извержений вулканов.

Работы по развитию радиотелетрических систем сбора и обработки сейсмологической информации с 1971 по 1986 г. вел В. А. Гаврилов, научным руководителем был С. А. Федотов.

Локальные сети на базе автономных сейсмических станций

Во многих случаях единственно возможный способ организации сейсмических наблюдений — применение автономных сейсмических станций (АСС). Это, например, срочная расстановка сети наблюдений в эпицентральной зоне сильных землетрясений, организация временных локальных сетей для изучения микросейсмичности или для регистрации сейсмических сигналов при извержении вулканов и др.

Серийные образцы аппаратуры такого назначения (станция АСС 6/12 производства Казгеофизприбор) по ряду показателей не удовлетворяют требованиям эксплуатации в труднодоступных районах Камчатки.

В 1982—1983 гг. для проведения наблюдений временными локальными сетями в ОМСП Института вулканологии совместно с кафедрой фи-

зика Земли физического факультета МГУ была разработана автономная сейсмическая станция (АСС) [22]. АСС имеет простую конструкцию, абсолютную калибровку сейсмометрических каналов, полный контроль параметров и малую потребляемую мощность.

По функциональному назначению весь комплекс делится на две части: запись и воспроизведение. Устройство записи вместе с дополнительными приборами и составляет автономную сейсмическую станцию. Устройство воспроизведения располагается в стационарных условиях и позволяет получать видимые записи АСС, вводить записи в ЭВМ и обрабатывать с помощью других вспомогательных приборов.

Основные технические характеристики:

Носитель информации, мм	магнитная лента 12,7
Скорость записи, мм/с	0,5
Скорость воспроизведения, см/с	4,7; 9,5; 19; 38
Число каналов	6 сейсмических, 2 служебных
Динамический диапазон сейсмического канала на двух уровнях, дБ	66
Диапазон регистрируемых частот, Гц	0,2—25
Точность хранения времени не хуже, с	0,1
Срок автономной работы по ленте, сут	12
Потребляемая мощность, Вт	0,3
Масса станции записи без источника питания, кг	25

На рис. 2 представлен стандартный вид АЧХ сейсмических каналов АСС. Величина чувствительности каналов по скорости находится в пределах 4000—9000 с. Тип характеристики (скорость, смещение и ускорение) выбирается при воспроизведении путем включения соответствующих фильтров.

В 1983—1985 гг. была изготовлена малая серия этой аппаратуры. Начиная с 1983 г., с помощью АСС проводились работы по изучению сейсмичности зоны стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, организовывались наблюдательные сети для регистрации вулканического дрожания, землетрясений и взрывов на вулкане Ключевской.

Число землетрясений, регистрируемых АСС, благодаря их высокой чувствительности в несколько десятков раз больше, чем на региональных сейсмостанциях. По опыту постановок локальных сетей на Камчатском полуострове в 1985 г., при обычной сейсмической активности на каждой станции за сутки регистрируется 40—50 землетрясений.

При создании системы обработки в первую очередь внимание было уделено получению результатов стандартной обработки и их хранению. Под стандартной обработкой мы понимаем получение бюллетеней станций и каталогов землетрясений.

На рис. 6 представлена схема организации обработки записей АСС, где отражены все этапы работ: подготовки, регистрации, возможные варианты обработки от визуализации до построения карт эпицентров и создания архива результатов.

Базовой машинной для системы обработки является мини-ЭВМ СМ-4. Работу технических средств поддерживает операционная система RSX-11M. Базы данных организованы при управлении системы управления базами данных (СУБД) Квант-М. Программное обеспечение (ПО) системы обработки разделяется на две части: системное и проблемное.

Системное ПО поддерживает ввод данных в ЭВМ и их преобразование, организует хранение в базе данных и выполняет разнообразные сервисные операции.

Проблемное ПО обеспечивает на основании данных архива получение результата, пригодного для интерпретации сейсмологом. При этом в проблемном ПО выделяется часть, которая должна выполняться в каждом случае для любой локальной сети. Это, например, определение гипоцентров землетрясений и их энергетическая классификация.

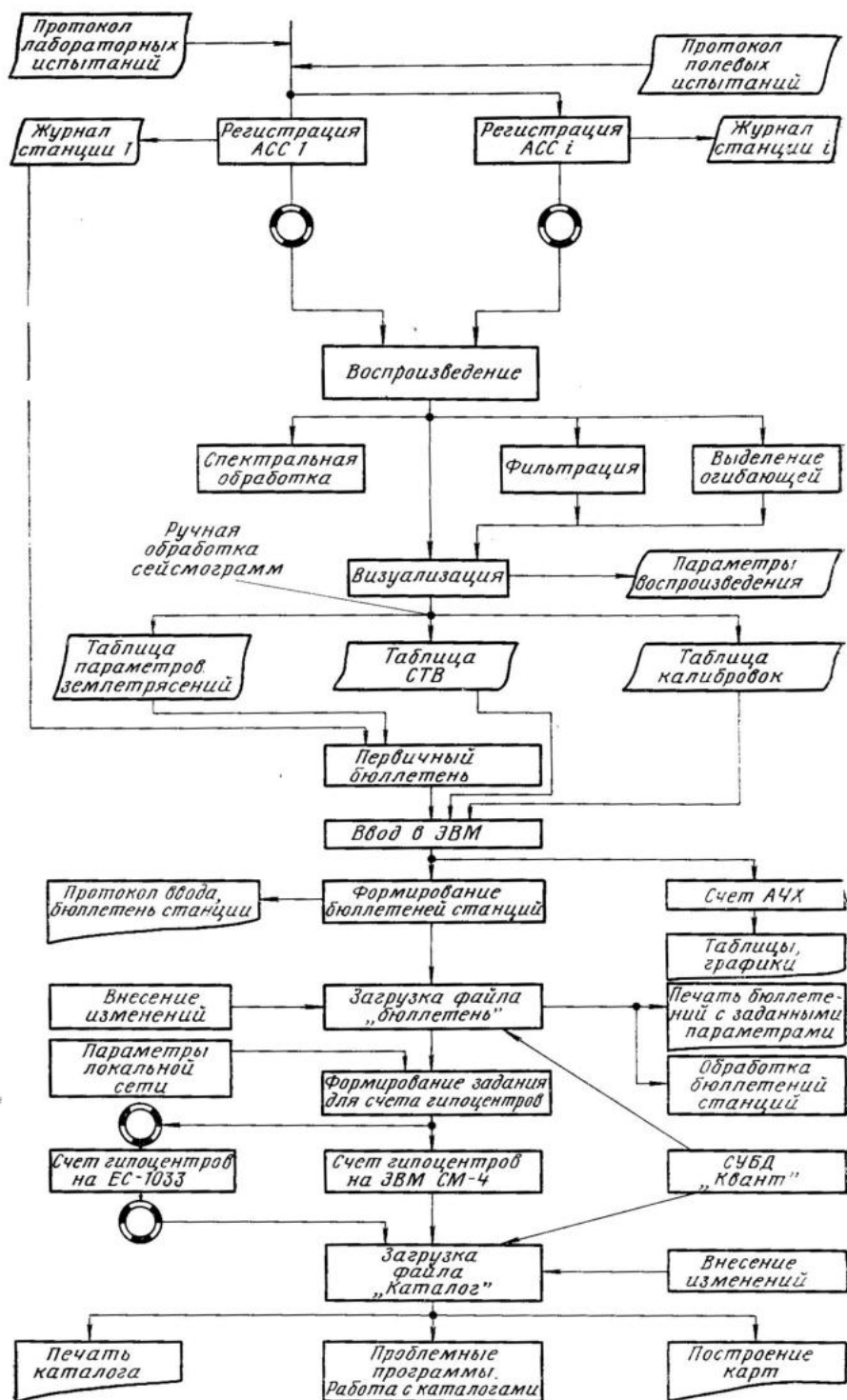


Рис. 6. Схема организации обработки информации, получаемой на автономных сейсмических станциях. Принятые сокращения: СТВ — сигналы точного времени, АЧХ — амплитудно-частотная характеристика

Окончательно система обработки информации, получаемой на локальных сетях, будет автоматизирована в плане выбора информации, представления ее в цифровом виде и дальнейшей стандартной обработки и хранения.

Работы по созданию автономных сейсмических станций и проведению наблюдений в полевых условиях в 1979—1986 гг. вел В. Н. Чебров под руководством Е. И. Гордеева.

Морские сейсмологические исследования с донными автономными сейсмографами (АДС) в прикамчатских акваториях впервые были начаты Институтом вулканологии в содружестве с кафедрой физики Земли МГУ в 1979—1981 гг. В институте эти работы вел В. Д. Феофилактов, сначала в составе Лаборатории подводного вулканизма, затем в отделе сейсмологии, а в 1984 г. под его руководством была создана специализированная Лаборатория сейсмики морского дна.

Первоначально исследования носили методический характер; результаты постановки буйковых донных сейсмографов в заливах и на континентальном склоне Восточной Камчатки осуществлялись с большими трудностями из-за мощного Курило-Камчатского течения. Первые записи на дне получены в 1981 г. одиночными приборами в более спокойном районе на подводной возвышенности Обручева южнее о-ва Беринга. При этом использовался донный сейсмограф разработки физического факультета МГУ с аналоговой низкоскоростной магнитной записью и высокочастотным (5 Гц) сейсмоприемником.

К 1984—1985 гг. Институт вулканологии благодаря сотрудничеству с институтом СОКТИ АН АрмССР получил партию донных сейсмографов С-016, ставших аппаратурной основой дальнейших исследований. К этому же времени в основном были подготовлены техника и методика морских работ в районе континентального склона. Все это позволило провести в 1984 и 1986 гг. успешные морские экспедиции на НИС «Вулканолог» и получить записи многочисленных подводных землетрясений. Первые же подводные сейсмограммы позволили уточнить режимы чувствительности приборов и оценить донный шум. Тщательность методических работ позволила полностью избежать потерь донных станций в 1984 и 1986 гг. В 26-м рейсе НИС «Вулканолог» (1986 г.) в районе о-ва Беринга и в Авачинском заливе осуществлено 14 успешных постановок донных сейсмографов с длительностью регистрации от 3 до 8 сут; группой из трех приборов с базой около 25 км впервые получены одновременные записи. Первые результаты обработки донных сейсмограмм позволили оценить отклонение времен пробега сейсмических волн от среднего камчатского годографа, а также амплитудные поправки, необходимые для осуществления энергетической классификации землетрясений, записанных донными сейсмографами.

Для района Командорских островов как по наблюдениям с донными сейсмографами, так и по материалам временной станции на о-ве Медный в первом приближении подтвердился океанический годограф И. П. Кузина, имеющий существенное отличие от среднего камчатского годографа из-за повышенной скорости сейсмических волн в верхней мантии под океаном.

Одновременно с освоением методики морских работ, испытанием новой аппаратуры и получением первых наблюдательных материалов осуществлено несколько методических разработок в области калибровки донных сейсмографов [18], техники буйковых постановок и обработки отдельных узлов регистрирующего тракта.

Дальнейшие работы будут направлены на уточнение морских годографов и скоростных разрезов с тем, чтобы донные наблюдения позволили существенно улучшить определение гипоцентров землетрясений в сейсмофокальной зоне.

Заключение

Сейсмичность Камчатки имеет существенные отличия по сравнению с другими сейсмоактивными регионами нашей страны. Во-первых, это самая высокая сейсмическая активность и возможность возникновения землетрясений максимальной энергии (как, например, землетрясение 4 ноября 1952 г. с $M=8,5$), во-вторых, существование объектов, весьма различных по проявлению сейсмичности, таких, как активные вулканы и зона Бенъоффа — Заварицкого, и в-третьих, одностороннее расположение главной эпицентральной зоны по отношению к наблюдательной сети. Все эти особенности создают специфические требования к развитию и организации наблюдательных сейсмометрических сетей. Для повышения точности определения координат землетрясений под дном океана сеть наблюдений расширяется в сторону океана с использованием донных сейсмических станций.

Большой энергетический диапазон землетрясений требует применения аппаратуры с широким динамическим диапазоном, что реализовано в результате применения в Камчатской региональной сети сейсмостанций аппаратуры для регистрации сильных землетрясений. Специальные сейсмологические наблюдения на действующих вулканах проводятся с помощью систем наблюдения, организованных либо радиотелеметрически, либо автономными сейсмическими станциями.

К настоящему времени сформировались четыре аппаратурно различные системы сбора сейсмометрической информации:

1. *Региональная сеть сейсмических станций*, позволяющая надежно регистрировать землетрясения в фокальной зоне Камчатки и Командорских островов (см. рис. 1) в диапазоне энергетических классов от 9,5 до 14 ($3,0 \leq M \leq 6,4$). Стандартная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) регионального сейсмографа (см. рис. 2) является оптимальной (по соотношению сигнал/шум) для аналоговой регистрации. Значительный спад АЧХ в области низких частот вызван интенсивными штормовыми микросейсмами. Расширение полосы пропускания аналогового сейсмографа в сторону низких частот без потери увеличения в высокочастотной части возможно с применением нескольких комплектов различной аппаратуры. Более эффективным средством создания универсальной системы наблюдений в широкой полосе частот и с большим динамическим диапазоном является применение цифровой регистрирующей аппаратуры.

В Камчатской региональной сети сейсмических станций планируется оснащение нескольких станций различными типами аналоговой аппаратуры, а также ведутся работы по применению цифровых методов регистрации.

2. *Сеть станций для регистрации сильных землетрясений* установлена в 8—9-балльной зоне и надежно регистрирует события с проявлением от 3 баллов и выше в пункте регистрации. Применяемая аппаратура позволяет регистрировать либо скорости смещения земной поверхности (ИСОП-С50), либо ускорения (ССРЗ-М) в диапазоне частот от 0,15 до 20 Гц.

3. *Радиотелеметрические системы* создаются для получения оперативной сейсмометрической информации в районах основной концентрации населения (район г. Петропавловска-Камчатского) и на наиболее активных вулканах (на Ключевской группе вулканов). Возможность установки автономных передающих пунктов в труднодоступных районах позволяет увеличить плотность размещения наблюдательных пунктов и проводить детальные исследования за сейсмическим режимом на более низком энергетическом уровне. В настоящее время в радиотелеметрических сетях используется два типа АЧХ (см. рис. 2). Система обработки с использованием вычислительной техники позволяет применять современ-

ные методы и проводить изучение разнообразных свойств сейсмических волн и процессов, происходящих в очаге землетрясений (поляризация, спектральные особенности и др.), а также вести оперативный контроль за сейсмическим режимом действующих вулканов.

В ближайшее время намечено завершение создания системы сбора и обработки сейсмометрической информации радиотелеметрической сети в районе г. Петропавловска-Камчатского и расширение числа передающих пунктов (до 10) для радиотелеметрической сети в г. Ключи.

4. Системы сбора на базе автономных сейсмических станций с магнитной записью применяются для организации локальных сейсмометрических сетей наблюдения в труднодоступных районах с возможностью создания гибкой конфигурации сети. В каждом случае сеть планируется под конкретную сейсмологическую задачу, а использование средств автоматизации и вычислительной техники в системе обработки позволяет получать качественную информацию и обрабатывать большие массивы исходных данных.

Сочетание сейсмометрических сетей различных типов дает возможность достаточно эффективно изучать региональную и локальную сейсмичность, ставить целый ряд актуальных сейсмологических задач. Вместе с тем повышение эффективности действующих сейсмометрических сетей, а тем более их дальнейшее расширение практически нереально без широкого внедрения автоматизированных методов сбора и обработки информации. Поэтому перспективные планы развития Камчатской региональной сети станций предусматривают частичную замену обслуживаемых станций на телеметрические пункты с радио- и проводными каналами связи с централизованной регистрацией в г. Петропавловске-Камчатском или в г. Ключи. При этом станции, замена которых на телеметрические пункты по тем или иным причинам будет нецелесообразна, предполагается оснастить аппаратурой выборочного цифрового накопления сейсмометрических данных и системами, обеспечивающими 1—2 раза в сутки автоматизированную передачу данных в Петропавловский центр. В результате указанная модернизация региональной сети позволяет относиться ко всем имеющимся средствам сбора и обработки сейсмометрической информации как к единой информационно-измерительной сети с унифицированным форматом представления данных.

В области морских сейсмологических наблюдений, в первую очередь для изучения региональной сейсмичности, следует отметить следующие ближайшие задачи. 1. Освоение в акваториях прикамчатских заливов, вплоть до оси глубоководного желоба, наблюдений группами из четырех-пяти донных сейсмографов с базой до 50 км и общей длительностью регистрации 1,5—2 месяца ежегодно. Такая группа может достаточно эффективно обеспечить регистрацию и определение гипоцентров землетрясений, начиная с пятого — шестого энергетического класса.

2. Одновременное изучение локальных особенностей годографов и скоростей сейсмических волн позволит повысить точность определения параметров гипоцентров как автономной морской группой, так и на основе ее данных береговой сетью региональных станций.

Авторы считают своим долгом с благодарностью отметить большой и успешный труд тех начальников отрядов, инженеров, техников и сотрудников сейсмических станций, которые участвовали в детальных сейсмологических наблюдениях на Камчатке и Командорских островах в 1961—1986 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викулин А. В., Синельникова Л. Г. Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке (к 70-летию сейсмостанции Петропавловск)//Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102—106.
2. Гаврилов В. А., Малкин А. П., Чебров В. Н., Сорокин В. В. Радиотелеметрическая

- система сбора сейсмической информации на Авачинско-Корякском полигоне//Бюл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 22—26.
3. Гусев А. А. Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ// Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 74—81.
 4. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Петропавловское землетрясение 24(25)XI//Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 163—171.
 5. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Усть-Камчатское землетрясение 15.XII//Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 172—184.
 6. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Иванова Е. И., Митякин В. П. Камчатское землетрясение 28 декабря 1984 г.//Землетрясения в СССР в 1984 г. М.: Наука, 1987. С. 133—143.
 7. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Козырева Н. П., Митякин В. П., Чиркова В. Н. Камчатское землетрясение 17 августа//Землетрясения в СССР в 1983 г. М.: Наука, 1986. С. 102—116.
 8. Ризниченко Ю. В. Методы массового определения координат очагов землетрясений//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 4. С. 425—437.
 9. Соколов Н. Е. Начало работы на сейсмической станции в с. Ключи на Камчатке//Бюл. вулканол. станций. 1949. № 16. С. 20—21.
 10. Токарев П. И. Козыревская сейсмическая станция//Бюл. вулканол. станций. 1960. № 29. С. 54—55.
 11. Токарев П. И. Сейсмические наблюдения на Камчатской вулканологической станции в 1958 г.//Бюл. вулканол. станций. 1962. № 33. С. 20—43.
 12. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
 13. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
 14. Федотов С. А., Шумилина Л. С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 9. С. 3—5.
 15. Федотов С. А., Шумилина Л. С. Развитие сейсмологических наблюдений на Камчатке//Проблемы современной сейсмологии. Голицынский чтения, 1981. М.: Наука, 1985. С. 71—86.
 16. Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг.//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 9. С. 1360—1375.
 17. Федотов С. А., Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Чепкунас К. Е. Озерновское землетрясение и цунами 22 (23) ноября 1969 г.//Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 195—208.
 18. Феофилактов В. Д. Регистрация землетрясений донными станциями. Некоторые вопросы методики//Сейсмологические исследования Мирового океана. М.: Изд-во Междувед. геофизич. комитета при Президиуме АН СССР, 1983. С. 57—64.
 19. Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И. О стандартизации характеристик региональной сейсмической сети станций и повышении точности наблюдений//Сейсмичность и глубинное строение Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Изд. ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 234—240.
 20. Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И. О стандартизации низкочастотной части частотной характеристики регионального сейсмографа//Вопросы оптимизации и автоматизации сейсмических наблюдений. Тбилиси: Мецниереба, 1977. С. 37—44.
 21. Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И. Сейсмические помехи и оптимальное увеличение в Камчатской сети//Сейсмические приборы. М.: Наука, 1979. Вып. 12. С. 152—161.
 22. Чебров В. Н., Сеницын В. И., Попов Е. В., Мельников Ю. Ю., Сергеев В. В., Федоров Е. С. Аппаратура для временных локальных сетей сейсмометрических станций// Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С. 91—97.

УДК: 550.34

ФЕДОТОВ С. А., ШУМИЛИНА Л. С., ЧЕРНЫШЕВА Г. В.

СЕЙСМИЧНОСТЬ КАМЧАТКИ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ ПО ДАННЫМ ДЕТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

SEISMICITY OF KAMCHATKA AND COMMANDER ISLANDS AS DERIVED FROM DETAILED STUDIES by, Fedotov S. A., Shumilina L. S., and Chernysheva G. V. Seismicity of Kamchatka and Commander Islands is analyzed on the basis of detailed seismic studies conducted in 1962—1983. More than 40 000 hypocenters were determined. Initial data are representative in terms of their duration and completeness. The location of hypocenters is shown on maps of epicenters for depths 0—50, 51—100, 101—150, 151—200, and 201—250 km on vertical sections oriented along and across Kuril-Kamchatka and Aleutian arcs. A large majority of foci lie within the seismofocal layer (Wadati—Zavaritskii—Benioff zone). Besides, the distinguished features are: the seismicity of the deep—sea trench and, in Kamchatka proper, the seismicity of faults, framing the depression of the Kamchatka River, of the volcanic belt and of the transverse structure located at the parallel bend of the trench, seismofocal layer, and of the belt of volcanoes. Graphs of earthquake recurrence, maps of seismic activity A_{10} , and released seismic energy D , and cumulative graphs of seismic energy are presented. In 1962—1983 an average number of small earthquakes occurred in Kamchatka but relatively few earthquakes were recorded with $M \geq 6$; seismic energy sufficient for several earthquakes with $M \sim 8$ has been accumulated. The mean amount of energy released in 1899—1986 per unit length of the arc in Kamchatka and Kuril Islands is equal (within the accuracy of a few per cent). This fact shows equal intensity of seismic processes along the entire Kuril-Kamchatka island arc. The authors discuss the relationship between seismicity on the one hand, and volcanism and tectonics, on the other. Further tasks are considered.

(Received July 1, 1987)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii; 683006, USSR

Institute of Physics of the Earth, USSR Academy of Sciences, Moscow; 123810, USSR

Institute of Physics of the Earth, Kamchatka Geophysical Station, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii; 683024, USSR

Сейсмическая деятельность у тихоокеанского побережья Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии достигает наивысшего на Земле уровня.

В Курило-Камчатской области происходит около 80% землетрясений СССР, в том числе почти все землетрясения с $M \geq 7 \frac{3}{4}$ и большинство глубоких. Глубины очагов в сейсмофокальном слое Курило-Камчатской островной дуги (зоне Вадати—Заварицкого—Беньюффа) достигают 650 км. На подводном склоне дуги лежат очаги больших цунамигенных землетрясений. Вдоль пояса вулканов Камчатки и Курильских островов, в котором находится около 12% наземных действующих вулканов Земли, наблюдаются многочисленные вулканические землетрясения и вулканическое дрожание, связанное с извержениями.

В районе Камчатского залива и Командорских островов расположена область стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, которая относится к наиболее важным и интересным тектоническим узлам

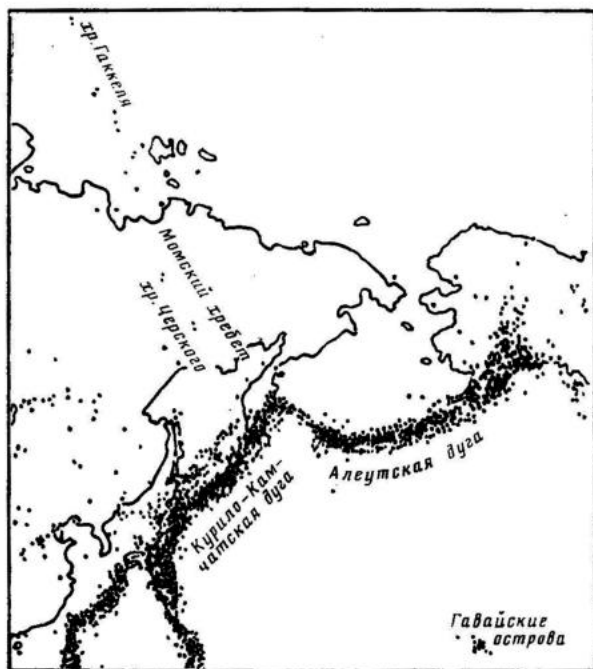


Рис. 1. Схема расположения сейсмических поясов, сходящихся в районе Камчатки. Эпицентры $M \geq 4,5$ за 1963—1977 гг.

мира (рис. 1). Здесь сходятся Курило-Камчатская, Алеутская (западным окончанием которой являются Командорские острова) островные дуги и крупный подводный хребет Императорских гор, тянущихся от Гавайских островов. Здесь же соединяются курило-камчатская и алеутская фокальные зоны с большим, но менее активным поясом землетрясений, протягивающимся сюда широкой полосой от Срединно-Атлантического хребта через хр. Гаккеля в Ледовитом океане к северной Камчатке по линии хр. Гаккеля — низовье р. Лены — хребты Момский и Черского — Магадан и п-ов Тайгонос (см. рис. 1). Эта линия может быть границей литосферных плит, положение которой является спорным для северо-восточной Азии. В районе стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг находится самое резкое пересечение глубоководных желобов в мире, а также один из самых мощных магматических центров мира — Ключевская группа вулканов.

Наиболее полные и точные данные о сейсмичности Камчатки были получены во время детальных сейсмологических исследований, которые начались здесь с ноября 1961 г. В этой статье по данным наблюдений 1962—1983 гг. рассматриваются такие общие свойства сейсмичности Камчатки и Командорских островов, как размещение очагов землетрясений энергетических классов $K_{S_{1,2}}^{\Phi_{0,8}} \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$), уровень сейсмичности и сейсмическая активность, сбрасывание сейсмической энергии, а также связь сейсмичности с тектоникой, геодинамикой и вулканизмом. Предварительно приводятся краткие сведения о сейсмичности Камчатки до периода детальных сейсмологических исследований, в 1737—1961 гг.

Изучение сейсмичности Камчатки в 1737—1961 гг.

В изучении сейсмичности Камчатки было несколько больших этапов: период макросейсмических наблюдений, XVIII—XIX вв.; период инструментальных наблюдений удаленными станциями, 1900—1961 гг.; период

детальных сейсмологических исследований, проводимых камчатской региональной сетью станций с ноября 1961 г.

Научные исследования на Камчатке были начаты в середине XVIII в. Первой и Второй Камчатскими экспедициями Витуса Беринга. Членом Второй Камчатской экспедиции, в задачи которой входило освоение северо-восточной части России (Охотское море, северная часть Тихого океана, Восточная Сибирь и Камчатка), был С. П. Крашенинников. Крашенинников составил классическое «Описание земли Камчатки», где назвал Камчатку страной огнедышащих гор и сильных «трясений земли» [17].

Первые исследователи Камчатки оставили подробные описания сильных землетрясений, свидетелями которых они были сами и о которых узнали из рассказов очевидцев.

Сводки макросейсмических данных о землетрясениях Камчатки в XVIII—XIX вв. имеются в большом количестве научных трудов [8, 9, 12, 19, 20, 22, 50 и др.]. Сведения о камчатских землетрясениях содержатся в исторических документах, архивах, в записях путешественников, натуралистов, офицеров и чиновников прошлых лет.

Главный итог всех этих сообщений и исследований — Камчатка оказалась краем с большим числом землетрясений, среди которых наблюдались и гигантские.

За период инструментальных (макросейсмических) наблюдений на Камчатке зафиксировано около 30 землетрясений с $M \sim 5-8$. Сведения об этих землетрясениях обобщены в «Новом каталоге» [21] и других публикациях.

Наиболее выдающимися событиями были землетрясения 1737 г. — $M \sim 8,3$; 1792 г. — $M \sim 8,4$; 1841 г. — $M \sim 8,4$; 1849 г. — $M \sim 7,5$ [21]. Протяженность очагов первых двух составляла более 300 км. Сила сотрясений достигала 9 баллов.

С начала XX в., точнее, с 1897 г. [47], мировая сеть сейсмических станций начала систематическую регистрацию землетрясений. С этого момента появляются инструментальные данные о землетрясениях Камчатки.

В первые годы эти данные были основаны на записях удаленных станций. Но в 1915 г. по предложению Б. Б. Голицына была открыта первая сейсмическая станция на Дальнем Востоке, в Петропавловске на Камчатке [5, 15, 36]. К сожалению, эта станция проработала недолго, всего до 1918 г., и была открыта вновь лишь в 1951 г. Поэтому событием, важным для наблюдений, было открытие в 1924 г. станции в Иркутске, ближайшей к Камчатке в то время. В дальнейшем появилась сеть станций общего типа на Дальнем Востоке СССР. В разные годы сейсмические станции были открыты во Владивостоке (1929); в Южно-Сахалинске (1948); Курильске (1952—1953), Северо-Курильске (1958) на Курилах; Охе (1958) на Сахалине; на Южных Курилах сеть из шести региональных станций стала работать с 1958 г. На самой Камчатке региональные станции открылись в пос. Ключи (1947 г.), в Козыревске (1958 г.) и на Апахончиче (1960 г.).

По мере совершенствования и расширения сети станций шло понижение уровня представительной регистрации камчатских землетрясений. В период 1897—1923 гг. представительными были лишь землетрясения с $M_{\text{атл}} = 7$; в 1924—1951 гг. с $M_{\text{атл}} = 6$, а к 1961 г. — с $M_{\text{атл}} = 5$ [2, 33]. К 1961 г. точность определения координат камчатских землетрясений оставалась еще низкой и составляла ± 50 км и более [2, 4]. Подробный анализ сейсмичности Камчатки этого периода дан в обзорной статье С. А. Федотова и А. М. Багдасаровой [33].

Карта эпицентров землетрясений с $M \geq 6$ за период инструментальных наблюдений (по 1961 г.) приведена на рис. 2. Координаты и магни-

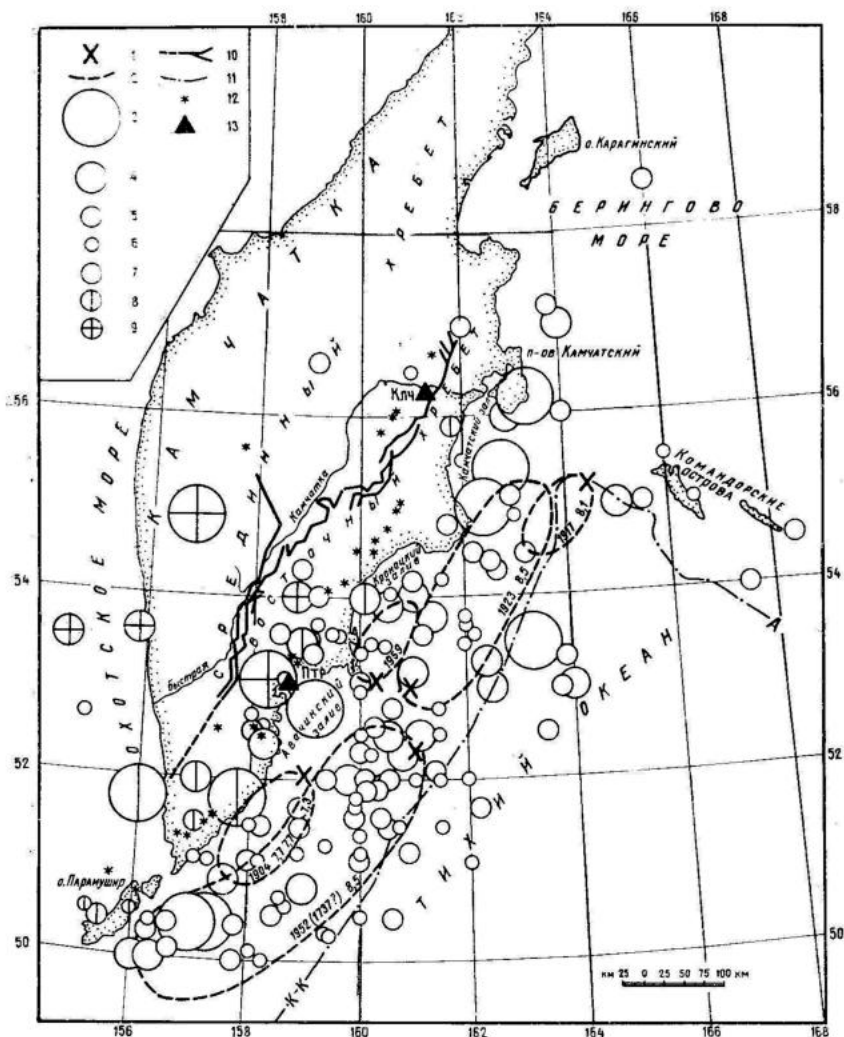


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Камчатки и Командорских островов за 1900—1961 гг., зарегистрированных до начала детальных наблюдений; $M \geq 6$. 1 — инструментальный эпицентр сильных ($M \geq 7,8$) землетрясений; 2 — область афтершоков землетрясений $M \geq 7,8$; 3—6 — эпицентры землетрясений: $M=7,5$ (7,3—7,75); $M=7,0$ (6,8—7,25); $M=6,5$ (6,3—6,75); $M=6,0$ (5,826,25) соответственно; 7—9 — глубина очага: 0—100; 101—200; больше 200 км соответственно; 10 — крупнейшие разломы, пунктир — предполагаемые [18]; 11 — оси глубоководных желобов: Курило-Камчатского (К—К) и Алеутского (А); 12 — вулканы; 13 — сейсмостанции

туды части землетрясений уточнены по сравнению с предыдущими работами [30, 31, 33] в соответствии с данными «Нового каталога...» [21].

На карте землетрясения обозначены кружками, радиус которых соответствует среднему радиусу очага землетрясения соответствующей магнитуды [26] в масштабе карты.

За 60 лет инструментальных наблюдений удаленными станциями у берегов Камчатки зарегистрировано два землетрясения с $M \approx 8,5$ (1923 г., 1952 г.); шесть землетрясений в диапазоне магнитуд 7,5—8,4, из которых следует отметить серию из трех землетрясений у берегов Южной Камчатки (два — $M=7,7$; одно — 7,3) 1904 г.; 14 землетрясений в диапазоне магнитуд 7,1—7,4.

Уровень сейсмичности и ее размещение у берегов Камчатки определили два гигантских землетрясения: 1923 и 1952 гг. с их многочислен-

ными афтершоками. Протяженность очагов 300—600 км. Очаг землетрясения 1923 г. протягивается от мыса Шипунский на север до п-ва Камчатский; очаг землетрясения 1952 г.— от мыса Шипунский на юг до о-ва Парамушир. С востока очаги ограничены Курило-Камчатским желобом, с запада — восточными п-овами Камчатки. По глубине эти два землетрясения, их афтершоки, а также все другие землетрясения в этой области охватывают слой 0—100 км, имея преобладающую глубину 40 км.

Более глубокие очаги расположены к западу от этой наиболее сейсмичной области. Глубины 100—200 км характерны для землетрясений, очаги которых находятся под поясом вулканов и Восточными хребтами Камчатки, на больших глубинах лежат очаги под Срединным хребтом, наибольшие глубины (500 км) характерны для очагов землетрясений, расположенных под Охотским морем.

На север и восток от п-ова Камчатский сейсмичность резко ослабевает: в 1900—1961 гг. в Беринговом море и у Командорских островов были зарегистрированы отдельные землетрясения с $M \geq 6$ (см. рис. 2).

В результате инструментальных сейсмологических наблюдений к 1961 г. были установлены действительный уровень сейсмичности Камчатки, существование фокального слоя (зона Вадати — Заварицкого — Беньоффа), общий характер размещения землетрясений. Были получены данные о главных толчках и роях афтершоков крупнейшего землетрясения 4(5).XI.1952 г. с $M \sim 8,5$, вызвавшего катастрофическое цунами [7, 27], и сильного землетрясения 4.V.1959 г. с $M \sim 7,6$, которое ощущалось в г. Петропавловске-Камчатском с силой 7—8 баллов [6, 7, 14, 46 и др.].

Кроме того, были зарегистрированы сейсмические явления, сопровождавшие извержение и направленный взрыв вулкана Безымянный в 1955—1956 гг., деятельность Ключевского вулкана [29] и др.

До 1961 г. на Камчатке не было сети сейсмических станций. До 1947 г. координаты очагов камчатских землетрясений определялись по данным удаленных станций с погрешностью обычно $\pm 1^\circ$. В 1947—1960 гг., после создания дальневосточной региональной сети сейсмических станций, ошибки определения координат эпицентров снизились в среднем до $\pm 0,5^\circ$. В эти годы слабые землетрясения регистрировались только вблизи сейсмостанций Ключи и Петропавловск.

Таких данных было совершенно недостаточно для изучения сейсмичности, ее связей со строением, свойств коры и мантии, связей сейсмичности с вулканизмом, геодинамикой, проведения сейсмического районирования.

Для решения этих и многих других задач сейсмологии и вулканологии была необходима развитая сеть сейсмических станций на Камчатке.

Детальные наблюдения 1961—1986 гг.

Камчатская сеть сейсмических станций была создана в 1960—1961 гг. Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) Института физики Земли АН СССР (ИФЗ) совместно с Камчатской геолого-геофизической обсерваторией АН СССР (КГГО) [37, 38]. Сеть начала регистрацию 1.XI.1961 г. С этого времени наступил третий период изучения сейсмичности Камчатки — период детальных сейсмологических исследований, длящихся до настоящего времени уже четверть века. 1.XI.1961 г. в сеть входили региональные сейсмические станции (рис. 3): Петропавловск (Птр), Тополово (Тпл), Усть-Большерецк (У-Б), Паужетка (Пжт), Семлячик (Смл). Летом 1962 г. к ним добавились станции на о-ве Беринга (Брн), Мильково (Млк), а в конце 1962 г., после включения КГГО и Лаборатории вулканологии АН СССР в новый Институт вулканологии (ИВ) Сибирского отделения АН СССР, в сеть во-

шли также три сейсмостанции, поставленные для наблюдений за Ключевской группой вулканов, — Ключи (Клч), Козыревск (Кзр), Апахончич (Апх). Эти 11 станций составили основу камчатской региональной сети, которая дополнялась в последующие годы.

Станции были оснащены однотипной короткопериодной аппаратурой с периодом маятников $T=1,2$ с, столообразной частотной характеристикой по смещению в диапазоне 1—20 Гц с увеличением $(5-10) \cdot 10^3$, максимум $30 \cdot 10^3$.

При определении координат очагов используются региональные скоростной разрез и годограф, построенные И. П. Кузиным и С. А. Федотовым [34]. По имевшимся данным глубинного сейсмического зондирования было известно, что толщина земной коры под Камчаткой равна в среднем 30 км. При изучении скоростного разреза мантии Курило-Камчатской дуги было установлено, что земная кора подстилается низкоскоростной мантией с $V_p=7,7-7,8$ км/с [34]. Эти цифры были использованы при расчете среднего регионального годографа. Скорости в верхней мантии под Камчаткой меняются в пределах 7,3—7,9 км/с [28, 35, 40] и могут повышаться под склоном глубоководного желоба, где расположена основная масса очагов землетрясений, поэтому невязки порядка 10—15 км вполне возможны на эпицентральных расстояниях около 400—500 км. Примерно такой величиной оценивается действительная средняя точность определения координат эпицентров камчатской региональной сетью [10].

Энергетическая классификация камчатских землетрясений производится по шкале $K_{S_{1,2}}^{\Phi_{08}} = \lg E$, Дж, где E — сейсмическая энергия короткопериодных S -волн [32]. $K_{S_{1,2}}^{\Phi_{08}}$ (в дальнейшем просто K) определяется для близких землетрясений на гипоцентральных расстояниях 0—850 км ($S-P=0-80$ с); точность $\pm 0,2$ в диапазоне классов 8—13. Главные соотношения с другими шкалами магнитуд и энергетических классов таковы:

$$K \simeq 1,5M_{LN} + 4,6, \quad (1)$$

$$K \simeq 2,0m_b + 2,1, \quad (2)$$

$$K \simeq K^{P_{04}} - 0,6, \quad (3)$$

M_{LN} — магнитуда, определяемая по поверхностным волнам в службе *ЕССН*, m_b — магнитуда по объемным волнам, определяемая сейсмологической службой США, $K^{P_{04}}$ — наиболее распространенная в СССР энергетическая шкала Т. Г. Раутиан [23, 24]. На рис. 4, б показаны контуры, в которых камчатская сеть регистрирует без пропусков землетрясения $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$, или $m_b \geq 3,2$); $K \geq 9,5$ ($M \geq 3,2$, или $m_b \geq 3,7$). На Камчатке и в прилегающей части Тихого океана, вплоть до глубоководного желоба, регистрируются все землетрясения с уровня $M \geq 4$ [39].

За четверть века наблюдений, с ноября 1961 по 1986 г., был получен огромный однородный массив данных. Каталог землетрясений за 1926—1986 гг. насчитывает 40 560 событий. Годовые каталоги и описание сейсмичности за текущий год публикуются в ежегодниках «Землетрясения в СССР» [13]. Сейсмичность Камчатки за отдельные периоды детальных наблюдений (1965—1968, 1969—1972 гг.) рассматривалась в отдельных статьях [41, 42]. Отдельно изучались землетрясения сейсмофокального слоя за 20 лет наблюдений (1962—1981 гг.) [39].

В данной статье охарактеризована сейсмичность Камчатки и Командорских островов за время детальных наблюдений с 1962 по 1983 г.

Период наблюдений превышает 20 лет. Он был сравнительно спокойным — произошло только два больших землетрясения, афтершоки которых вызывали временное повышение уровня сейсмичности в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской дуг. Это были Озерновское зем-

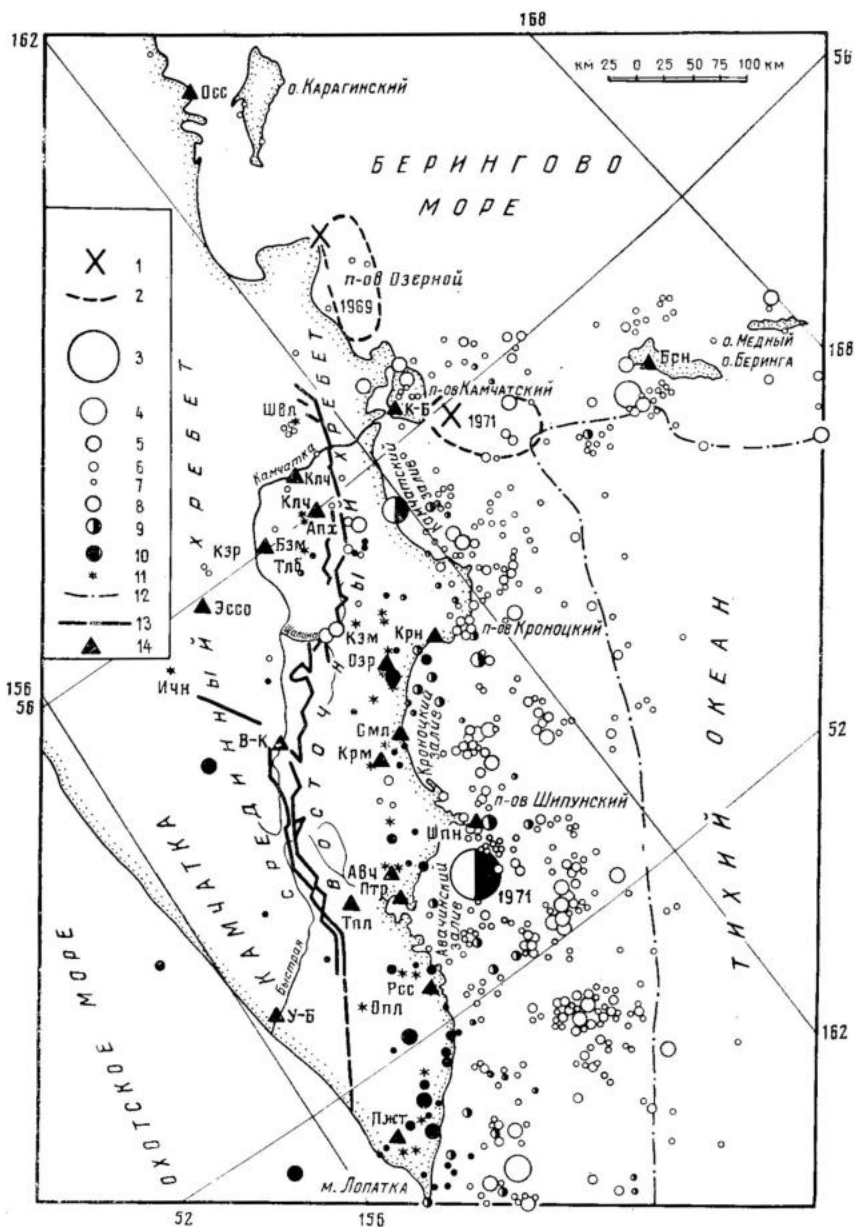


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений $K \geq 11,5$ ($M \geq 4,6$ или $m_b \geq 4,7$) за 1962 — 1983 гг. детальных наблюдений. 1 — инструментальные эпицентры Усть-Камчатского землетрясения 1971 г., $M=7,8$ и Озерновского землетрясения 1969 г., $M=7,7$; 2 — границы очаговых областей этих землетрясений по афтершокам; 3—7 — эпицентры землетрясений: $M=7,2$; $K=15$; 14; 13; 12 соответственно; 8—10 — глубины очагов: 0—50, 51—100, больше 100 км соответственно; 11 — вулканы: Швч — Шивелуч, Клч — Ключевская сопка, Апх — Апахончич, Бзм — Безымянный, Тлб — Толбачик, Кзм — Кизимен, Крм — Карымский, Ичн — Ичинский, Опл — Опала; 12 — оси глубоководных желобов: Курило-Камчатского (К—К) и Алеутского (А); 13 — крупнейшие разломы [18], пунктир — предполагаемые; 14 — сейсмические станции: К-Б — Крутоберегово, Осс — Оссора, Брн — Беринг, Клч — Ключи, Апх — Апахончич, Кзр — Козыревск, Эссо — Кроноки, Озр — Озеро, Смл — Семлячик, Крм — Карымский, Авч — Авача, Шпн — Шипунский, Птр — Петропавловск, Рсс — Русская, Тпл — Тополово, Пжт — Паужетка, У-Б — Усть-Большерецк, В-К — Верхнекамчатск, Мдн — Медный

летрясение 22.XI.1969 г., $M=7,7$, $H=40$ км [43] и Усть-Камчатское землетрясение 15.XII.1971 г., $M=7,8$, $H=30$ км [11].

В целом детальные сейсмологические наблюдения 1961—1986 гг. настолько продолжительны и однородны, что с учетом распределения очагов больших землетрясений прошлых лет позволяют судить о долговременных чертах сейсмичности Камчатки и Командорских островов.

Размещение очагов землетрясений в 1962—1983 гг.

Последовательный ряд карт эпицентров и вертикальных разрезов иллюстрирует размещение очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов в 1961—1983 гг. (рис. 3—8).

На рис. 3 приведена карта эпицентров сравнительно сильных землетрясений 1962—1983 гг., которые имеют энергетический класс $K \geq 11,5$ ($M \geq 4,6$, или $m_b \geq 4,7$). Подобные землетрясения регистрируются мировой сетью сейсмостанций. Размеры кружков, отображающих эпицентры, равны размерам очагов землетрясений в масштабе карты. Оценка среднего радиуса очага сделана по среднемировой зависимости между магнитудой (классом) и радиусом, полученной Ю. В. Ризниченко [26], с учетом различия в шкалах K и K^{P64} . Такое изображение эпицентров позволяет представить объем пространства, охваченный сейсмическими подвижками за годы наблюдений.

Основная масса землетрясений и все наиболее сильные ($M \geq 7$) произошли у восточных берегов Камчатки. В этой части региона очаги охватывают земную кору и самые верхние слои мантии (глубины ≤ 100 км). В более глубоких слоях мантии землетрясения происходят к западу от тихоокеанского побережья Камчатки, под Камчаткой и Охотским морем.

Большинство землетрясений региона происходит на глубине 0—100 км между восточным побережьем Камчатки и Курило-Камчатским глубоководным желобом. Это камчатское звено сейсмического пояса Курило-Камчатской островной дуги, которое имеет длину 800 км. В нем выделяется наиболее сейсмичная полоса, протягивающаяся вдоль Камчатки через крупные полуострова ее восточного побережья — Шилунский, Кроноцкий, Камчатский (см. рис. 3). Примечательна более слабая полоса землетрясений, протягивающаяся вдоль дна глубоководного желоба. Между этими полосами были рои землетрясений. Наиболее устойчивые среди них расположены к югу от п-ова Шилунский.

В области стыка Курило-Камчатского и Алеутского глубоководных желобов тихоокеанский сейсмический пояс поворачивает на юго-восток к Командорским островам. Здесь, под островами Беринга и Медным, глубже 100 км очагов не наблюдается.

Северное окончание курило-камчатского сейсмического пояса прослеживается вдоль западного побережья Берингова моря через п-ов Озерной и о-в Карагинский (см. рис. 3).

На самой Камчатке наиболее сильные землетрясения с глубиной очагов 0—100 км происходили вдоль крупных живых сбросов, обрамляющих Восточный хребет Камчатки в грабене р. Щапина и севернее нее (см. рис. 3).

Более полное и подробное представление о положении очагов, их связи с основными структурами и вулканическим поясом Камчатки дают послойные карты эпицентров для глубин 0—50, 51—100, 101—150, 151—200, 201—250 км (рис. 4). Они построены для землетрясений 1962—1982 гг. с $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$, или $m_b \geq 3,2$). Большинство этих землетрясений регистрируется только камчатской сетью сейсмостанций: основные станции сети и граница области, в которой регистрируются все землетрясения с $K \geq 8,5$, показаны на рис. 4, б. Программа для построе-

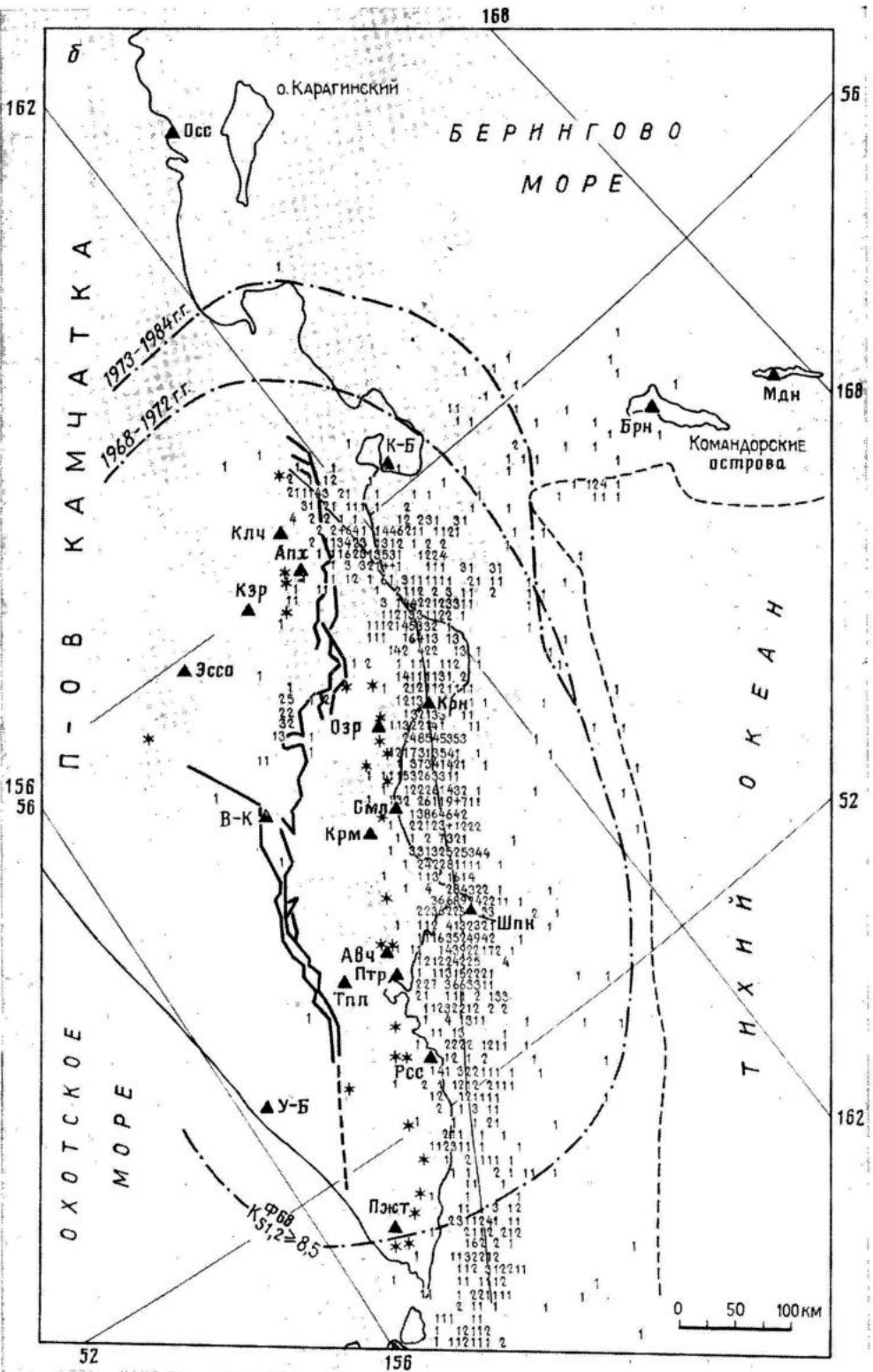


Рис. 4, б

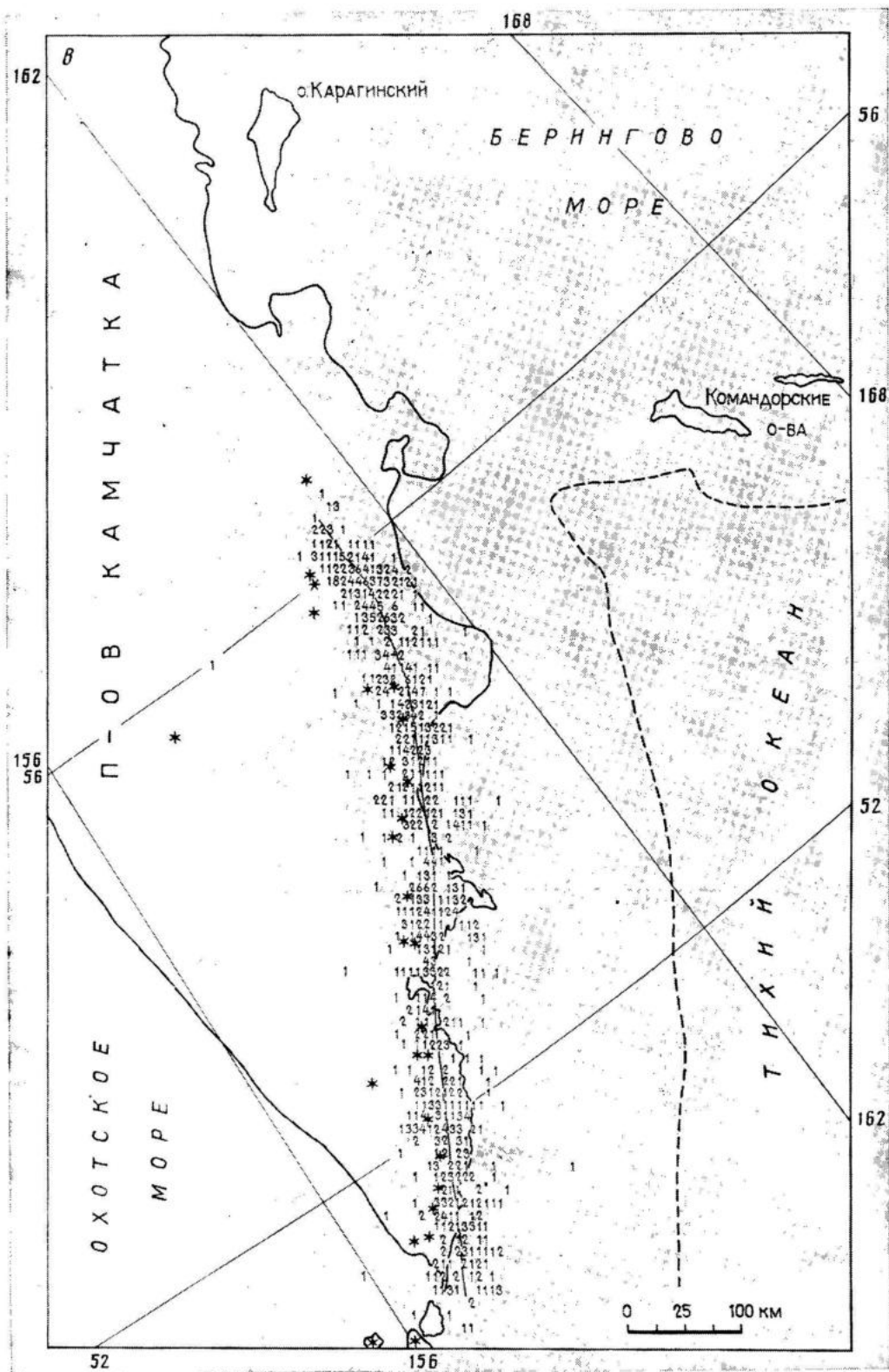


Рис. 4, в

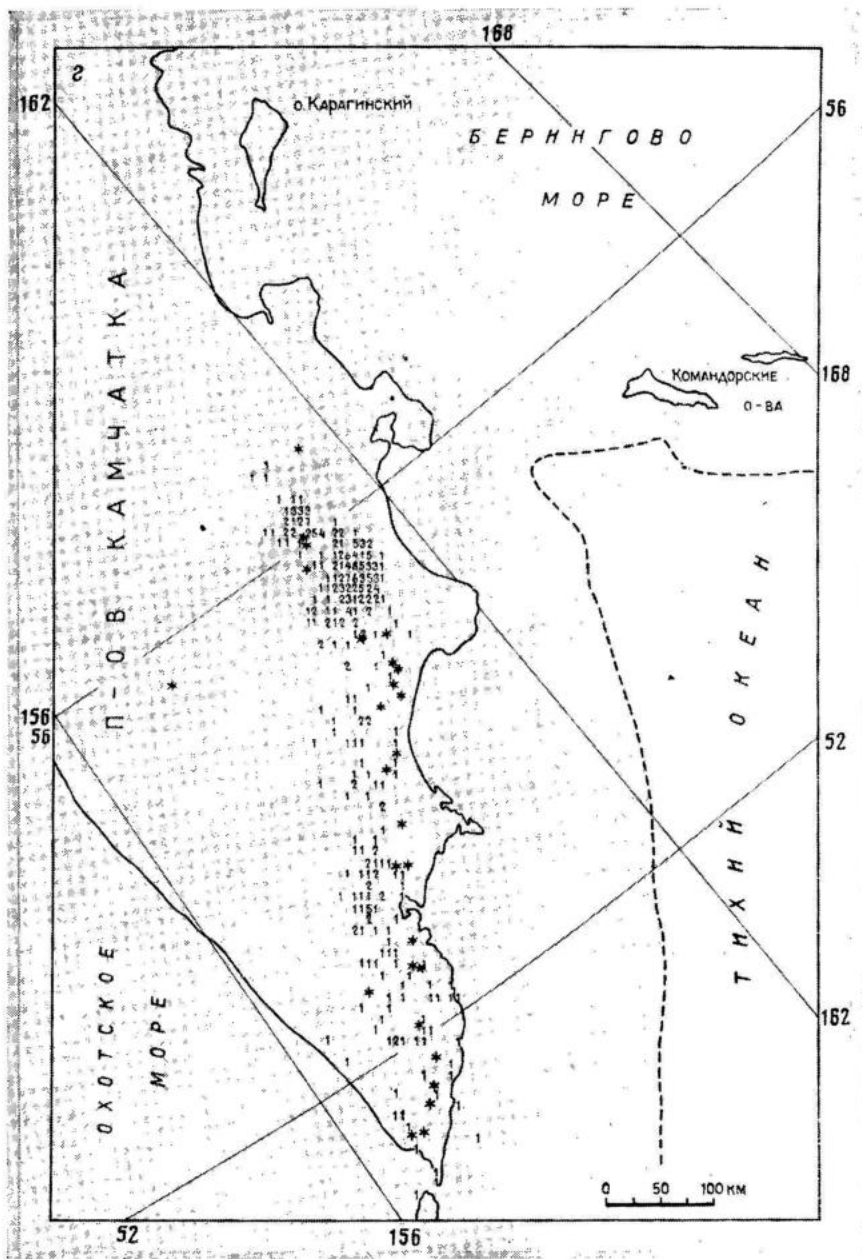


Рис. 4, г

ния карт и разрезов на ЭВМ была составлена А. А. Гусевым, З. М. Пономаревой и Г. В. Чернышевой.

Как можно видеть, сравнивая карты эпицентров для разных слоев (см. рис. 4), большинство землетрясений региона происходит в литосфере на глубинах 0—50 км — в земной коре, толщиной 20—40 км, и в прилегающей к ней части верхней мантии. Карта эпицентров землетрясений глубин 0—50 км (см. рис. 4, а) наиболее отчетливо иллюстрирует связи сейсмичности с тектоникой.

Мощной полосой шириной 200—250 км протягивается между восточным побережьем Камчатки и глубоководным желобом камчатское звено тихоокеанского сейсмического пояса. Здесь сейсмичность достига-

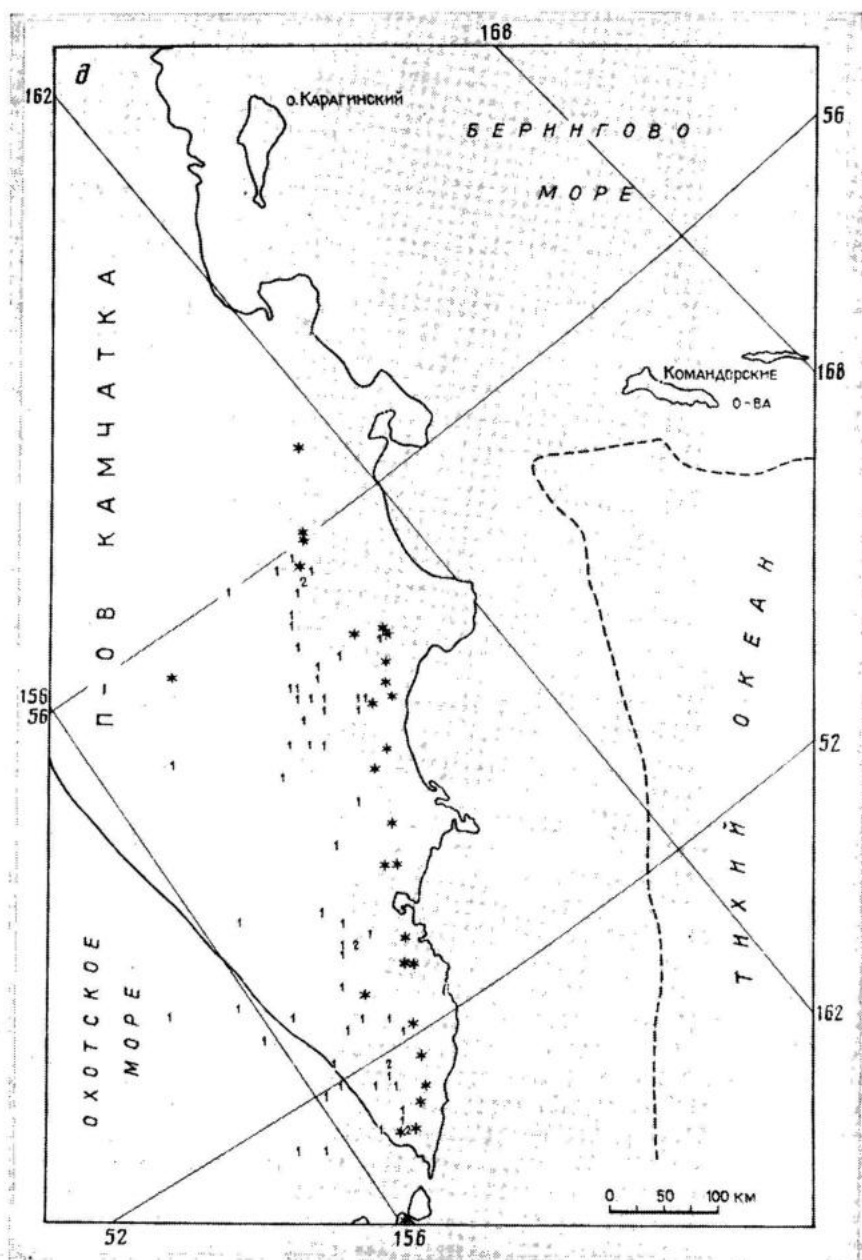


Рис. 4, а, б, в, г, д. Карты плотности эпицентров землетрясений $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$ или $m_b \geq 3,2$) за 1962—1982 гг. по слоям (км). а — 0—50; б — 51—100; в — 101—150; г — 151—200, д — 201—250. 1—4 — число землетрясений в прямоугольнике размером $6,25 \times 10,5$ км²: от 1 до 9; от 10 до 20; от 21 до 30; больше 30 соответственно; 5 — линия, соединяющая точки с максимальной плотностью; 6 — действующие вулканы; 7 — оси глубоководных желобов; 8 — контур надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$; 9 — крупнейшие разломы [18], пунктир — предполагаемые; 10 — сейсмические станции

ет максимального уровня, существующего на Земле. Наиболее активен западный край, где сейсмофокальный слой (зона Вадати—Заварицко-го—Беньоффа) начинает погружаться под Камчатку. Пояс раздваивается и его северная ветвь уходит в Берингово море и на северную Камчатку.

Для землетрясений Командорских островов примечательно то, что они окружают сравнительно малосейсмичный блок о-ва Беринга.

Под Камчаткой землетрясений существенно меньше, чем у ее берегов, в фокальной зоне. Здесь землетрясения связаны с тектоническими структурами земной коры меньшего по сравнению с фокальной зоной порядка.

Современные тектонические движения и живые разломы Камчатки изучены недостаточно. На карте (см. рис. 4, а) нанесены только некоторые крупные и хорошо выраженные в рельефе тектонические нарушения [18].

Землетрясения с глубинами до 100 км протягиваются полосами вдоль вулканического пояса, вдоль Восточного хребта и долинного грабена в верховьях р. Камчатки, а также вдоль южной части Срединного хребта (см. рис. 3; 4, а). Их сгущения видны в северном окончании пояса вулканов, где находятся Ключевская группа вулканов и вулкан Шивелуч, а также в Козыревско-Быстринском своде возле станции Эссо (см. рис. 4, а, б).

Очень интересна широтная полоса землетрясений, протягивающаяся от грабена р. Шапина к северной части Кроноцкого полуострова (см. рис. 3; 4, а). В этом месте происходят смещение на запад цепи вулканов и изгиб Курило-Камчатского глубоководного желоба в том же направлении. Этот тектонический узел, по-видимому, связан с взаимодействием Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг и заслуживает отдельного тщательного изучения.

Наибольшее по магнитуде коровое землетрясение Камчатки за время детальных наблюдений отмечено в Шапинском грабене в 1963 г., $M \approx 6$. В Козыревско-Быстринском своде магнитуда сильнейшего землетрясения равнялась 5,5 в 1962 г.

На глубинах 51—100 км (см. рис. 4, б) сейсмичность значительно ослабевает, зона существенно сужается (~75 км), линия максимальной плотности перемещается примерно на 40 км к западу, протягиваясь по основаниям восточных полуостровов Камчатки. К северу от п-ова Камчатский землетрясения на этих глубинах не происходят. Поворот на алеутское направление отмечается отдельными событиями. Зато отчетливо прослеживается поворот фокальной зоны от Кроноцкого полуострова на 40° к северу, в направлении вулкана Шивелуч. Западная граница фокальной зоны проходит по Восточному вулканическому поясу. Далее на запад, непосредственно под п-овом Камчатка эпицентры почти отсутствуют, за исключением некоторого числа землетрясений в районе Ключевской группы вулканов и Шапинского грабена.

Наиболее существенное, что вытекает из рис. 4, б,— срез сейсмофокального слоя Камчатки на глубинах 51—100 км и явно меньшая связь землетрясений этих глубин с блоковой тектоникой. В отличие от слоя 0—50 км лишь под крупнейшими живыми разломами Камчатки имеются землетрясения с глубинами очагов 51—100 км, образующие сгущение в районе уже отмеченного Шапинского грабена.

На глубинах 101—150 км (см. рис. 4, в) число землетрясений уменьшается, фокальная зона сужается еще более (~50 км), линия максимальной плотности подвинута далее на запад. Западная граница почти совпадает с вулканическим поясом. Поворот фокальной зоны на север от Кроноцкого полуострова прослеживается четко. К востоку и западу от фокальной зоны землетрясения отсутствуют. Единственное исключение представляет собой землетрясение, произошедшее под Срединным хребтом в районе последнего действующего вулкана — Ичинского (см. рис. 3; 4, в). Алеутское направление не прослеживается вовсе.

На рис. 4, в есть ряд примечательных совпадений: полоса очагов землетрясений сейсмофокального слоя на глубинах 101—150 км строго параллельна поясу действующих вулканов Камчатки и оси Курило-Кам-

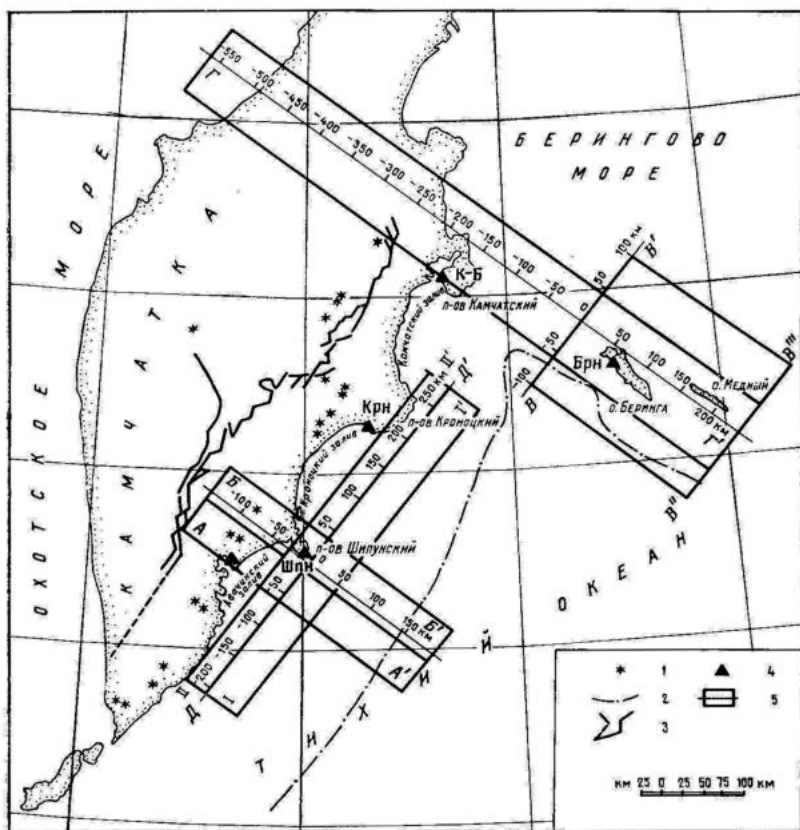


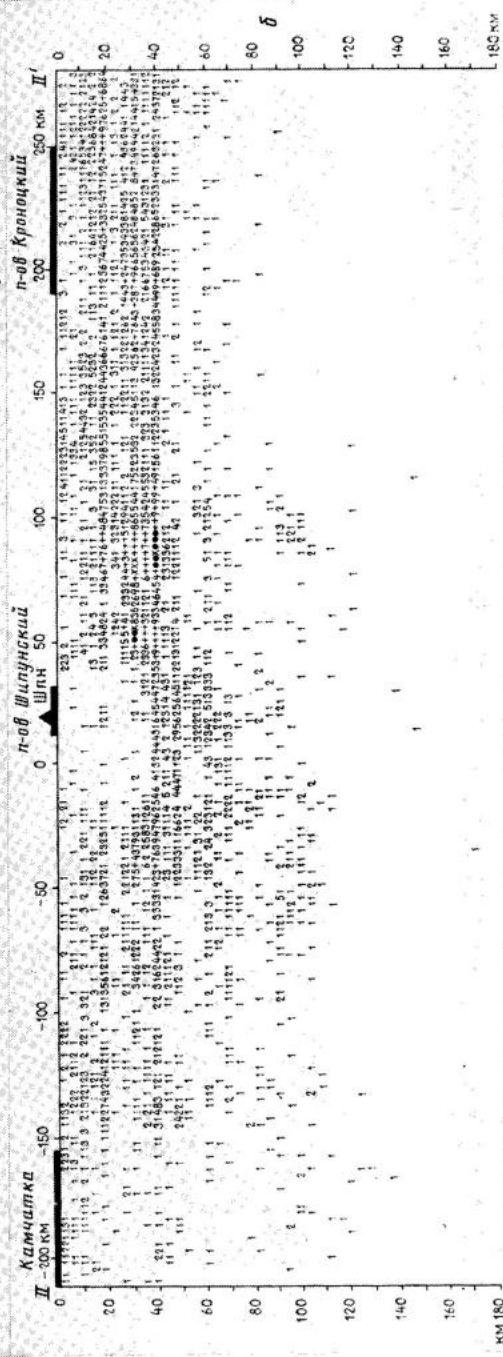
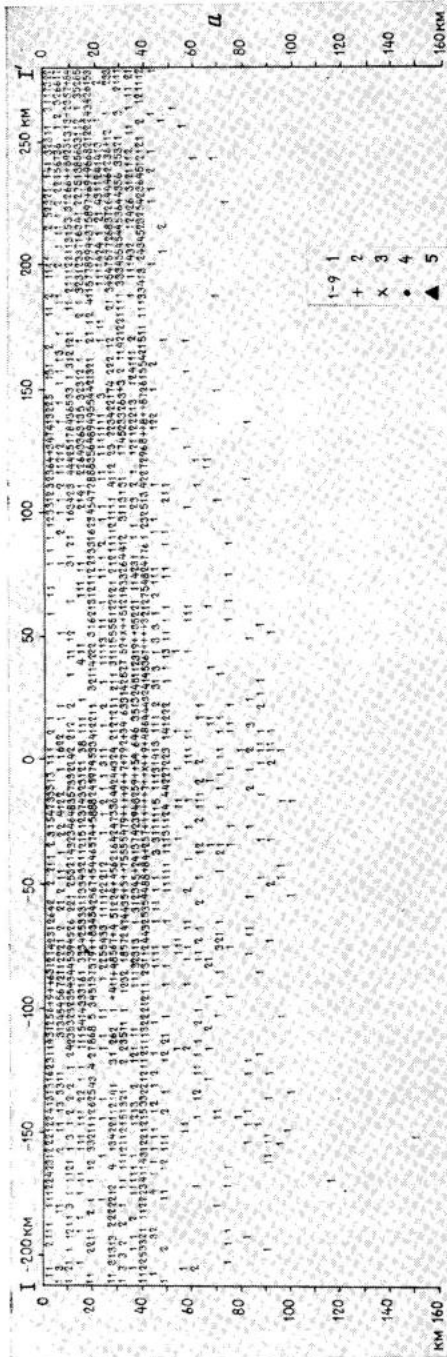
Рис. 5. Схема расположения участков и линий, по которым построены вертикальные разрезы фокальной зоны. 1 — вулканы; 2 — оси глубоководных желобов; 3 — крупные разломы [18], пунктир — предполагаемые; 4 — сейсмические станции; 5 — линии разрезов и границы участков, для которых построены разрезы

чатского глубоководного желоба; линия максимальной плотности гипоцентров глубин 101—150 км совпадает с западной границей пояса действующих вулканов. Рисунок 4, в — одно из наиболее очевидных доказательств существования связи между тектоническими процессами, приведшими к образованию глубоководного желоба, сейсмической деятельностью в сейсмофокальном слое на глубинах 101—150 км и возникновением пояса действующих вулканов островной дуги.

На глубинах 151—200 км продолжается уменьшение числа землетрясений (см. рис. 4, г). Землетрясения происходят только в сейсмофокальном слое. Он сдвинут далее на запад, вулканический фронт является уже восточной границей полосы землетрясений этого слоя. По-прежнему четко виден поворот северного края сейсмофокальной зоны на север, к вулкану Шивелуч.

На глубинах 201—250 км (см. рис. 4, д) фокальная зона представлена отдельными землетрясениями. Эпицентры еще дальше отодвинуты на запад. На севере фокальная зона обрывается у Ключевской группы вулканов. Появляются землетрясения под Охотским морем. Вне фокальной зоны землетрясения по-прежнему отсутствуют.

Ряд важных свойств размещения очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов виден на вертикальных разрезах. Схема расположения участков, для которых строились вертикальные разрезы, помещена на рис. 5. Два разреза построены вдоль сейсмофокального слоя Камчатки (полосы I—I' и II—II'), два — вкрест сейсмофокального слоя



Камчатки (полосы $A-A'$ и $B-B'$), один — для Командорских островов вкост алеутского простираия ($B-B'$) и один — для Командорских островов и Камчатки вдоль алеутского простираия ($\Gamma-\Gamma'$). Разрезы построены на ЭВМ по программе, составленной А. А. Гусевым, З. М. Пономаревой, Г. В. Чернышевой.

Продольные вертикальные разрезы вдоль сейсмофокального слоя Камчатки построены для двух полос длиной 500 и общей шириной 75 км, покрывающих его наиболее активную часть (рис. 6). Хорошо видно, что большинство землетрясений происходит здесь на глубинах 0—40 км. По мере приближения к Камчатке глубины очагов возрастают. Примечательной особенностью является пониженная сейсмичность под п-овом Шипунским — крупной поперечной структурой Восточной Камчатки. То же уменьшение сейсмичности видно на поперечном разрезе (рис. 7, б). Менее уверенно прослеживается аналогичное уменьшение числа землетрясений под Кроноцким полуостровом. Для выяснения причин этого явления нужны дополнительные исследования.

В центре региона большое число станций и лучшее их расположение по отношению к очагам обеспечивают точность определения координат эпицентров и глубин выше средней. Это дало возможность построить поперечные вертикальные разрезы крупного масштаба по линиям AA' , BB' для этого участка фокальной зоны с целью более детального анализа ее внутренней структуры (см. рис. 7, а, б и рис. 5).

На поперечных разрезах отчетливо видно, что область максимальной сейсмичности — глубины 0—40 км. Полоса наибольшей плотности очагов на этих глубинах падает от желоба в сторону континента и смыкается с наклонной частью фокального слоя на глубинах 40—50 км (см. рис. 7, а, б).

На глубинах 50—150 км обнаруживается тенденция к двуслойному расположению очагов. Размер почти асейсмичной области между слоями превышает погрешность определения положения очагов. Аналогичная особенность в строении фокальной зоны впервые была отмечена для Японской дуги по данным о микроземлетрясениях [44, 45, 48, 49, 52, 53].

Разрезы на рис. 7, а, б очень интересны с точки зрения геодинамики и механизма глубинных процессов в области островных дуг. Наряду с этим они показывают положение области очага большого землетрясения, которое способно вызвать максимальные возможные сотрясения в Петропавловске-Камчатском, главном городе Камчатки, и дают независимые доказательства того, что сила землетрясений в Петропавловске-Камчатском может достигать 8—9 и 9 баллов (см. след. раздел).

На рис. 7 нанесено положение подошвы земной коры, положение гипоцентров и вероятные плоскости разрывов для трех последних сильнейших землетрясений, бывших в районе $AA'BB'$ (см. рис. 5): 4(5).XI.1952 г. с $M \approx 8,5$; 4(5).V.1959 г. с $M = 7,6-7,9$ и 24.XI.1971 г. с $M = 7,2$. Как показывает рис. 7, наиболее сейсмична верхняя часть сейсмофокального слоя, расположенная на глубинах 10—40 км, где слой изгибается и начинает погружаться под Камчатку, под островную дугу.

На рис. 8 показано расположение очагов землетрясений в районе Командорских островов — западного окончания Алеутской островной дуги, — и ближайшей к ним части Камчатки. На поперечном разрезе (см. рис. 8, а) видно, что фокальная зона у Командорских островов имеет ширину 150 км. 99% землетрясений происходит здесь на глубинах 0—50 км. Глубже 100 км землетрясения не наблюдались.

Продольный разрез вдоль полосы $\Gamma-\Gamma'$ (см. рис. 8, б) показывает расположение очагов землетрясений вдоль алеутского простираия. Эта

Рис. 6. Продольные разрезы фокальной зоны по линии I—I' (а) и II—II' (б). Землетрясения $K \geq 7,5$ ($M \geq 2$, или $m_b \geq 2,7$) за 1962—1981 гг. 1—4 — то же, что на рис. 4; 5 — сеймостанция

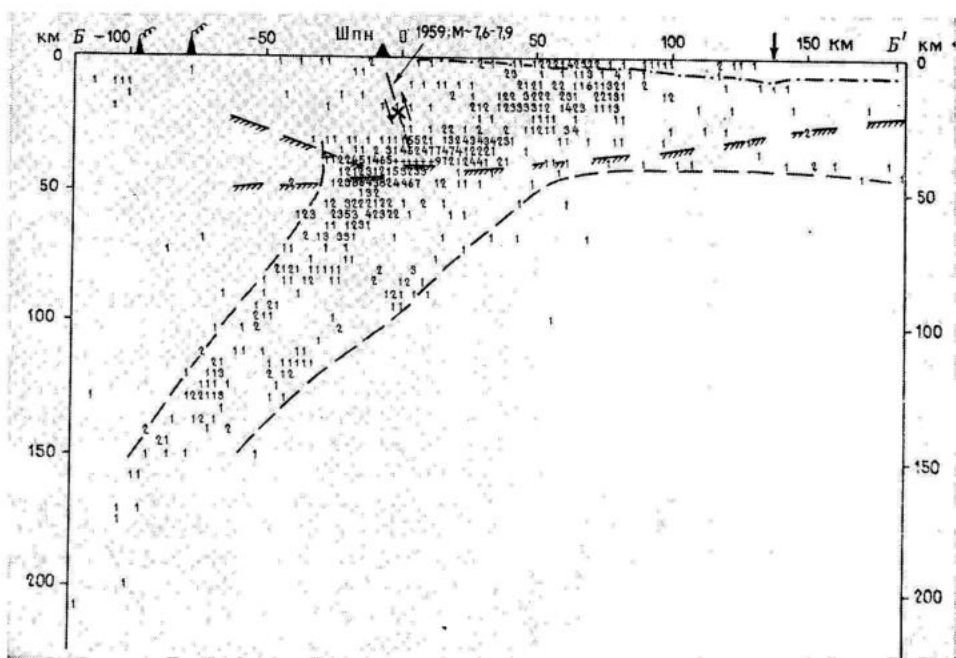
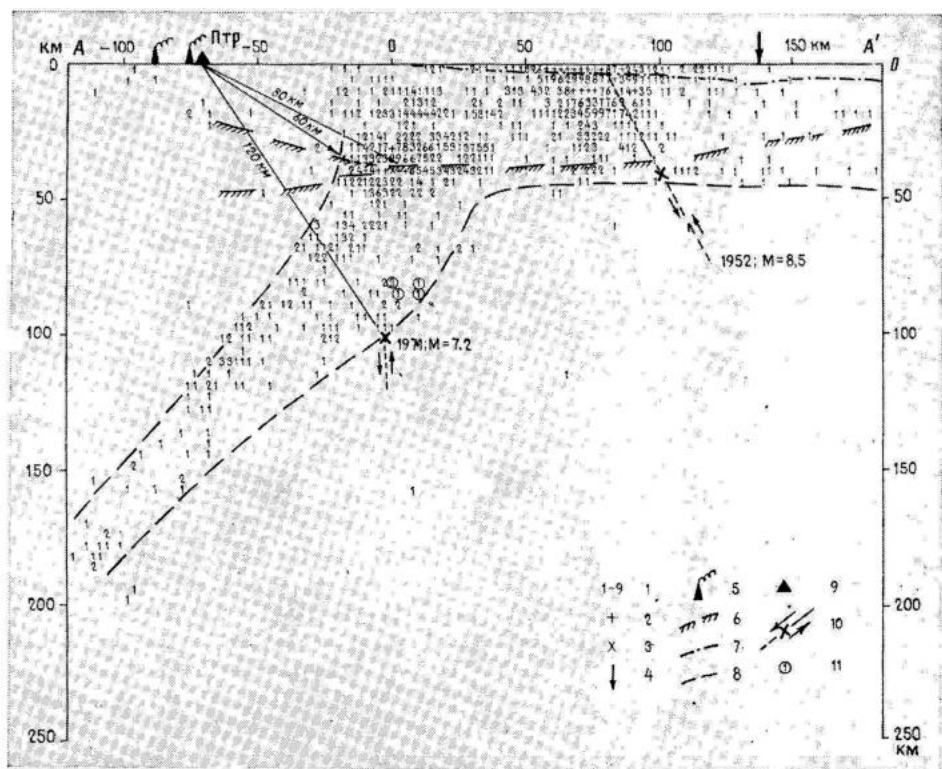


Рис. 7. Поперечные разрезы фокальной зоны для районов северной части Авачинского залива (А) и мыса Шипунского (Б). Землетрясения $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$ или $m_b \geq 3,2$) за 1962—1981 гг. 1—3 — то же, что на рис. 4; 4 — ось глубоководного желоба; 5 — вулканы; 6 — граница Мохоровичича [3]; 7 — рельеф морского дна; 8 — контур фокальной зоны; 9 — сейсмические станции; 10 — след плоскости подвижки и направление подвижки в очагах землетрясений 1971 г. с $M=7,2$ [1], 1959 г. с $M=7,6$ и 1952 г. с $M=8,5$ [52]; 11 — афтершоки землетрясения 1971 г.

полоса проходит через Командорские острова (расстояние 0—250 км вдоль Γ — Γ' , см. рис. 8, б), Камчатский пролив (расстояние от 0 до —150 км), п-ов Камчатский и Восточный хребет Камчатки (от 150 до —250 км), затем уходит за линию разломов в Камчатскую депрессию (250 км и далее). Пояс действующих вулканов Камчатки остается южнее полосы Γ — Γ' . Ближайший к полосе действующий вулкан — Шивелуч (Швл). Наибольшей сейсмичностью в полосе Γ — Γ' обладают районы п-ова Камчатский с Камчатским проливом и о-ва Беринга. Сравнивая рис. 8, б с рис. 3 и 4, а, можно видеть, что первый район захватывает очень активную часть сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг и поворота тихоокеанского сейсмического пояса. Во втором районе высокая сейсмичность вызвана напряженной тектонической обстановкой. Остров Беринга находится на расстоянии всего 30—40 км от Алеутского глубоководного желоба, который достигает здесь максимальных глубин в своей западной части. Между о-вом Беринга и желобом находится один из наиболее крутых подводных склонов Тихого океана.

В полосе Γ — Γ' землетрясения отсутствовали к западу от линии крупных четвертичных разломов и сбросов, отделяющих Восточный камчатский хребет от Центральной камчатской депрессии. Это свидетельствует о том, что современные контрастные движения, связанные со структурами алеутского простираения, продолжают на Камчатке на запад не далее Восточного камчатского хребта (см. рис. 3, 4, а, 5, 8, б).

Повторяемость землетрясений, сейсмическая активность, выделение сейсмической энергии на Камчатке в 1962—1983 гг.

В этом разделе приводится ряд основных характеристик сейсмической деятельности на Камчатке и Командорских островах, полученных в период детальных сейсмологических исследований в 1962—1983 гг.

На рис. 9 представлены графики повторяемости камчатских землетрясений. Графики I и II построены для всей сейсмоактивной территории региона ($\sim 1300 \times 650$ км²). График I соответствует наблюдениям удаленными станциями ($M=6-8$) (табл. 1), график II — детальным наблюдениям ($K=11-13$) (табл. 2).

Следует отметить хорошее согласование данных разномасштабных систем наблюдений, когда еще используются и различные шкалы оценок энергии.

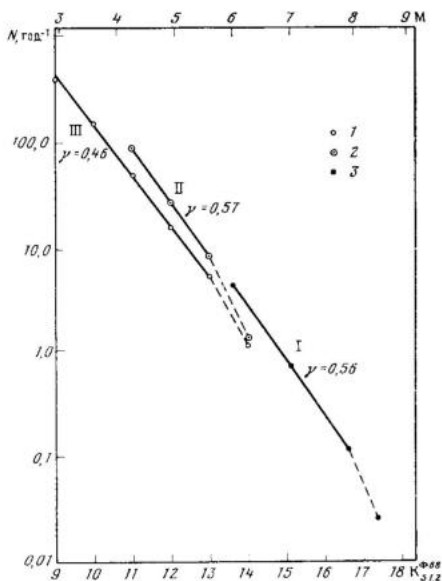
Графики I и II имеют одинаковый наклон $\gamma \simeq 0,56-0,57$ в диапазоне $K=11-13$ и $M=6-7$ за существенно различные периоды времени. Наклон общего графика — $\gamma=0,52$. Примечательно совпадение уровней графиков I и II. Оно означает, что в спокойный период 1964—1980 г. на Камчатке происходило обычное, среднее число слабых землетрясений, хотя не было землетрясений с $M=8$.

Правый конец графика II отклоняется вниз, явно показывая, что в сравнительно спокойный период 1964—1980 гг. на Камчатке недоставало землетрясений с $K=14$ ($M=6$).

График III построен по данным детальных наблюдений 1964—1980 гг. и относится к площади размером около 750×400 км², которую охватывает контур надежной регистрации землетрясений классов $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$) (см. рис. 9, табл. 3 и рис. 4, б). В пределах этого контура все землетрясения с этого уровня регистрируются не менее чем тремя станциями. Так как контур охватывает только часть камчатского региона то, естественно, график III располагается ниже графика II (см. рис. 9). График III прямолинеен в интервале $K=9-13$, угол наклона $\gamma=0,46$. Так же как на графике II, аномально мало землетрясений класса $K=14$ ($M \sim 6-6,5$), что объясняется относительным сейсмическим затишьем в 1964—1980 гг.

Величина γ в представительных участках графиков повторяемости на рис. 9 меняется от 0,46 до 0,52. Статистически более обосновано значение $\gamma=0,46$ для землетрясений с $K=9-13$ ($M=2,6-5,9$). Из табл. 1 видно, что группирование землетрясений в этом интервале не искажает значение γ . За долговременную среднюю оценку наклона графика повторяемости камчатских землетрясений с глубинами очагов 0—100 км можно принять значение $\gamma=0,46$. Оно должно быть точным для слабых землетрясений, поэтому целесообразно пользоваться им при расчетах сейсмической активности с постоянным γ .

Рис. 9. Графики повторяемости камчатских землетрясений. 1 — среднегодовое число землетрясений $K \geq 8,5$ в контуре надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$ по данным детальных наблюдений 1964—1980 гг.; 2 — среднегодовое число землетрясений $K \geq 11$ на всей площади региона по данным детальных наблюдений 1964—1980 гг.; 3 — среднегодовое число землетрясений $M \geq 6$ по данным инструментальных телесейсмических наблюдений 1899—1977 гг.



Разница в наклонах графиков I—III на рис. 7 могла быть вызвана не только различием в сейсмических процессах для сильных, средних и слабых землетрясений, но изменениями сейсмических процессов по площади. Такое предположение возникает потому, что графики I и II построены для всего камчатского региона, а III — лишь для его части.

Изменение величины γ по площади показано на карте (рис. 10), построенной для землетрясений с $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$) за 1963—1983 гг. в слое 0—100 км. В наиболее активной области, у восточного побережья Камчатки, в фокальной зоне $\gamma=0,45-0,5$, т. е. совпадает с наклоном графиков на рис. 9. Непосредственно на Камчатке $\gamma=0,5-0,7$, что свидетельствует об относительном возрастании количества слабых землетрясений. В глубоководном желобе, наоборот, относительно повышается число сильных землетрясений и $\gamma=0,35-0,5$. Изолинии γ в районе Командорских островов и к югу от Камчатки, где появляются значения 0,3—0,35, менее надежны из-за пропусков слабых землетрясений и поэтому проведены пунктиром.

Форма изолиний γ сложна. Общей закономерностью поля значений γ является уменьшение γ от Камчатки к глубоководному желобу и соответственно возрастание в том же направлении относительного числа сильных землетрясений.

Сейсмическая активность A_{10} является одним из наиболее удачных показателей интенсивности сейсмической деятельности. В нашем случае A_{10} — нормированное число землетрясений класса $K=10$ ($M=3,6$) с глубиной очага 0—100 км в год на площади 1000 км². Величина A_{10} почти близка к плотности эпицентров слабых землетрясений. На рис. 11 приведена карта A_{10} для Камчатки, построенная по данным детальных

Распределение землетрясений Камчатки по магнитуде M с глубиной очагов 0—100 км

M	Период наблюдений	Число зарегистрированных землетрясений	Число землетрясений в год
8,5	1899—1977 (78 лет)	2	0,0256
8 (7,5—8,4)	1899—1977 (78 лет)	9	0,1153
7 (6,5—7,4)	1899—1977 (78 лет)	56	0,7179
6 (5,5—6,4)	1924—1977 (54 г.)	222	4,1111

Примечание. Телесейсмические наблюдения, см. график 1 на рис. 9. $\gamma=0,56$.

Таблица 2

Распределение землетрясений Камчатки по энергетическим классам K за 1964—1980 гг. (17 лет); глубина очагов 0—100 км

K	Число зарегистрированных землетрясений	Число землетрясений в год
14 (13,5—12,6)	22	1,3
13 (12,5—13,4)	149	8,76
12 (11,5—12,4)	478	28,12
11 (10,5—11,4)	1497	88,06

Примечание. Детальные наблюдения региональной сетью, см. график 11 на рис. 9. $\gamma=0,57$.

Таблица 3

Распределение землетрясений Камчатки по энергетическим классам K за 1964—1980 гг. детальных наблюдений в контуре $K \geq 8,5$, глубина очагов 0—100 км, $\gamma=0,46$.
График III на рис. 9

Число землетрясений	Класс K						
	9	10	11	12	13	14	15
Общее	6738	2589	871	276	83	19	3
За год	396	152	51	16,2	4,9	1,1	

Примечание. Землетрясения суммируются в интервалах $K \pm 0,5$, т. е. $K = 8,5-9,4; 9,5-10,4$ и т. д.

наблюдений 1963—1983 гг. Значения A_{10} определялись на площадках 100×100 км с шагом 50 км. Карта строилась по методике Ю. В. Ризниченко [25].

Как показано на рис. 11, сейсмическая активность возрастает в 200 раз от центральной части Камчатки, где $A_{10}=0,01$, к ее тихоокеанскому побережью, где $A_{10}=1,0-1,9$. Изолиния $A_{10}=1,0$ ограничивает полосу, под которой находится наиболее сейсмичная часть фокального слоя островной дуги. A_{10} уменьшается в несколько раз от максимальных значений по направлению к глубоководному желобу и Командорским островам, где $A_{10}=0,1-0,5$. Примечательно устойчивое понижение сейсмической активности в области очага серии сильных землетрясений, происходивших в 1904 г. у берегов Южной Камчатки.

Соотношение между накоплением потенциальной сейсмической энергии и ее выделением на Камчатке в период детальных исследований в 1962—1983 гг. показано на карте D (рис. 12). D — мера сбрасывания сейсмической энергии, введенная в [29]:

$$D(t) = \frac{E_2(t)}{E_1} \quad (4)$$

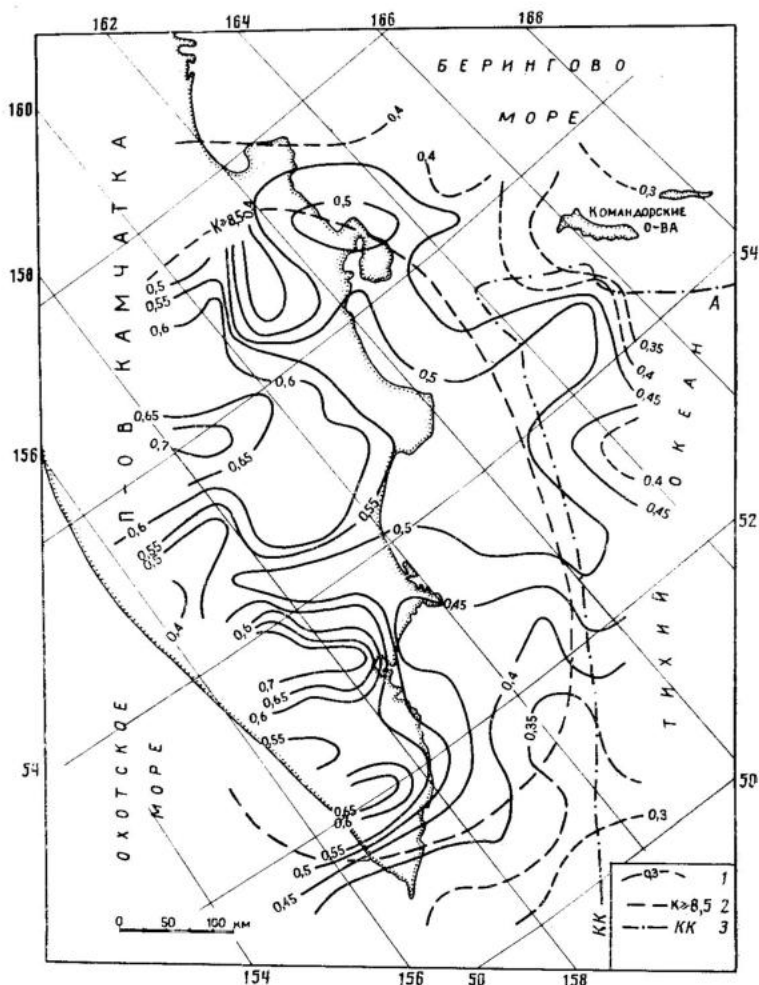


Рис. 10. Карта величины наклона графика повторяемости (γ) по землетрясениям за 1963—1983 гг. с глубинами очага 0—100 км для $K \geq 8,5$. Площадка осреднения 100×100 км², шаг 50 км; 1 — изолинии γ , пунктир — менее надежные; 2 — контур надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$; 3 — оси желобов

$E_2(t)$ Дж/10³ км²год — удельная сейсмическая энергия землетрясений, наблюдавшихся в исследуемом районе за время t , а E , Дж/10³ км²год — средняя годовая сейсмическая энергия, выделяемая в регионе. Значение D рассчитаны для области размером 750×200 км, ограниченной рамкой на рис. 12. В ней в 1900—1985 гг. высвободилась суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E = 64,4 \cdot 10^{16}$ Дж; средняя удельная величина выделяв-

Таблица 4

Влияние группирующихся землетрясений на наклон графика повторяемости

Число землетрясений	Класс K							γ
	9	10	11	12	13	14	15	
Общее	3728	1492	491	138	43	3	2	0,46
Без группирующихся	2540	1018	322	104	43	3	2	0,46

Примечание. Данные за 1964—1973 гг. в контуре надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$, глубина очагов 0—100 км.

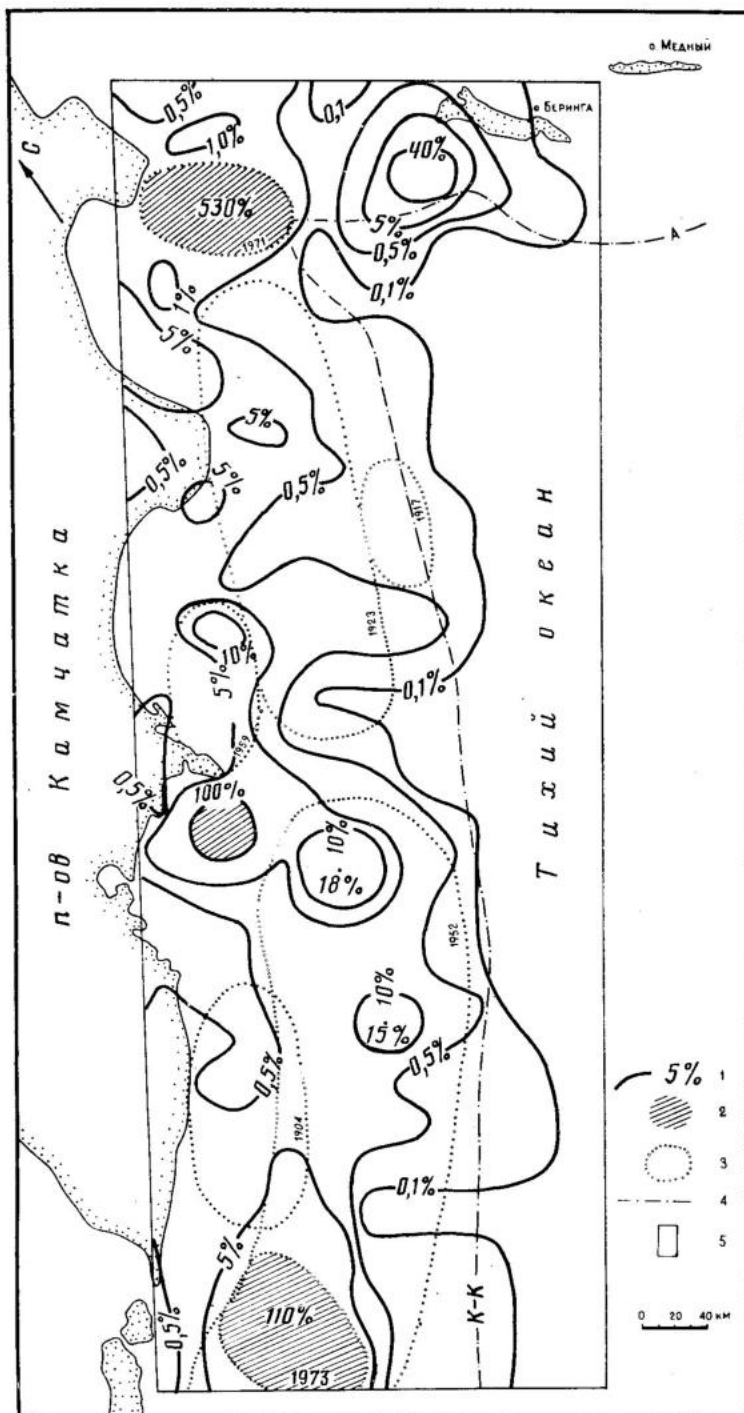


Рис. 12. Карта отношения сброшенной сейсмической энергии к накопленной (D) на Камчатке за 1962—1982 гг. 1 — изолинии D ; 2 — области, где сброс превышает 100%; 3 — границы афтершоковых областей сильных землетрясений; 4 — оси желобов; 5 — область подсчета D

Если бы при расчете D использовалось значение E_1 , меняющееся вкрест сейсмофокальной зоны, то величины D были бы в 2 раза меньше в полосе максимальной сейсмичности у побережья Камчатки и в несколько раз больше в районе глубоководного желоба, чем на рис. 12. Такие искажения сравнительно невелики, так как величина D меняется на 3—4 порядка.

Изолинии D построены для землетрясений 1962—1982 гг. и даны в процентах. При $D=100\%$ разрядка сейсмической энергии в течение рассматриваемого времени равна ее среднему накоплению за то же время. Как видно на рис. 12, выделение сейсмической энергии превосходило ее накопление только в областях очагов трех сильных ($M>7$) землетрясений 1971 и 1973 гг. Значительная разрядка напряжений (10—40%) произошла в роях землетрясений; располагавшихся возле о-ва Беринга, к северу и югу от п-ова Шипунский. На остальной площади рассматриваемой области $D<100\%$, т. е. на ней преобладало накопление сейсмической энергии.

Выделяется минимум $D=0,5\%$, расположенный южнее Петропавловска-Камчатского в Авачинском заливе и северной части области очага серии сильных землетрясений 1904 г. (см. рис. 2, 3, 12). Этот минимум окружен цепочкой максимумов D . Другой, менее резкий минимум D образован в районе Кроноцкого полуострова. Эти особенности важны для долгосрочного прогноза.

Итоги, сейсмическая обстановка, задачи

Сейсмический цикл больших землетрясений с $M\geq 7\frac{3}{4}$ в Курило-Камчатской островной дуге длится 140 ± 60 лет [31], поэтому представительные данные о сейсмичности Камчатки можно получить только при продолжительных наблюдениях. 25 лет детальных наблюдений на Камчатке были достаточно долгим временем для того, чтобы определить многие основные черты ее сейсмичности, выявить важные связи сейсмичности с другими явлениями и собрать данные, позволяющие решать необходимые научно-прикладные задачи. Часть основных фактов и результатов была кратко изложена выше.

Детальные исследования впервые дали точные сведения о расположении очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов, их связи с глубинным строением, тектоникой, геодинамикой и вулканизмом и т. д. Получены наиболее подробные в СССР данные о сейсмичности в области островной дуги, сейсмофокальной зоны Вадати—Заварицкого—Беньоффа, погружения литосферных плит и современной вулканической деятельности. Детальные данные о расположении очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов служат основой для многих других исследований. Среди них задачи долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогнозов сильных землетрясений.

Несомненно, что продолжение детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке пополнит, расширит и углубит наши знания о ее сейсмичности. При дальнейших исследованиях желательнее скорее восполнить ряд остающихся пробелов. Сравнительно плохо изучена сейсмичность глубоководного желоба, где из-за одностороннего расположения сейсмостанций низка точность определения глубины очагов. Нужны специальные исследования в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, Командорских островов и участка Алеутской дуги между Командорскими и Ближними Алеутскими островами, а также важного для понимания геодинамики продолжения курило-камчатского сейсмического пояса, уходящего на север вдоль побережья Берингова моря. Все еще скудны и недостаточно точны данные о связи сейсмичности с живыми разломами и современными движениями на самой Камчатке; здесь выделяется интересная поперечная полоса земле-

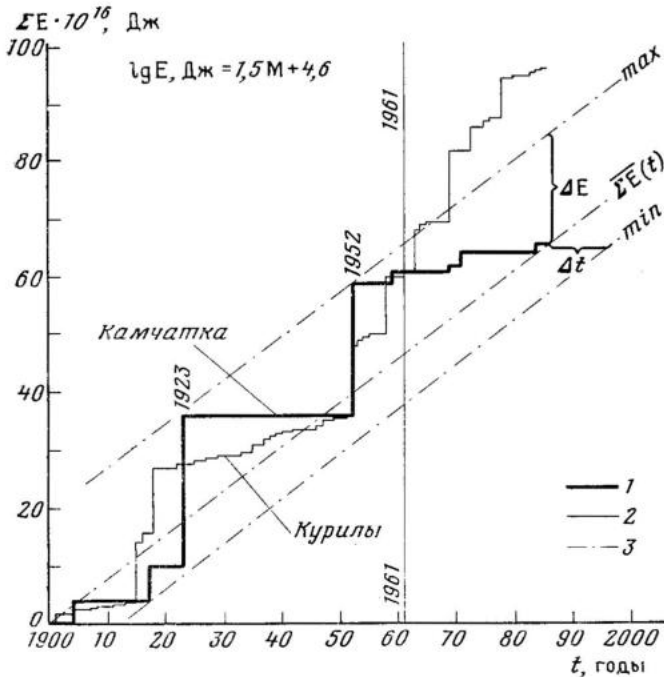


Рис. 13. Кумулятивная сейсмическая энергия $\Sigma E(t)$, высвобожденная при землетрясениях с $M \geq 6$, $H = 0-100$ км на Камчатке и Курильских островах в 1899—1986 гг. 1 — график для Камчатки; 2 — график для Курильских островов; 3 — средний, минимальный и максимальный уровни графика $\Sigma E(t)$ для Камчатки

трясений, тянущаяся от Шапинского грабена к северной оконечности Кроноцкого полуострова.

Размышляя о задачах на будущее, необходимо принимать во внимание ту сейсмическую обстановку, которая сложилась на Камчатке к концу 25-летнего периода детальных исследований. Обратимся к рис. 13. Кумулятивные графики сейсмической энергии, выделившейся в очагах землетрясений нашего века, с 1899 до июля 1986 г., построены отдельно для курильского и камчатского звеньев Курило-Камчатской островной дуги. Длина курильского звена — 1250, камчатского — 800 км. Поскольку почти вся сейсмическая энергия выделяется при землетрясениях с $M \geq 7$, то нет существенных пропусков землетрясений. Вертикальная линия отделяет период детальных наблюдений на Камчатке: 1961—1986 гг. Проведены средний график $\overline{\Sigma E}(t)$ для Камчатки и параллельные ему прямые max и min, ограничивающие полосу, в которой лежит график за время 1899 — июль 1986 гг.

Кумулятивные графики $\Sigma E(t)$ для Камчатки и Курильских островов в целом оказались близкими. Различие в ходе графиков за 1961—1986 гг. состоит в том, что на Камчатке в это время длилось относительное сейсмическое затишье, а на Южных Курилах с 1958 г. шла мощная серия землетрясений с $M \geq 7,7$. В 1899—1986 гг. на Курильских островах выделилось в среднем $\overline{E} = 1,11 \cdot 10^{16}$ Дж/год сейсмической энергии, а на Камчатке $\overline{E} = 0,74 \cdot 10^{16}$ Дж/год. Поделив эти значения на длину соответствующих звеньев дуги, получаем сейсмическую мощность на километр длины островной дуги: $\omega = 0,88 \cdot 10^{13}$ Дж/год · км дуги для Курильских островов и $\omega = 0,92 \cdot 10^{13}$ Дж/год · км дуги для Камчатки. Таким образом, в среднем в нашем веке сейсмическая мощность Камчатки была на 5% больше, чем Курильских островов. Столь небольшое различие подтверждает представление о том, что сейсмический процесс про-

текает примерно с одинаковой интенсивностью вдоль всей Курило-Камчатской дуги. Вероятно, также, что к настоящему времени с погрешностью менее 10% стало известно долговременное среднее годовое количество энергии, высвобождающейся в Курило-Камчатской дуге $\bar{E} = 1,80 \cdot 10^{16}$ Дж/год, что соответствует энергии землетрясения с $M \approx 7,8$. Средняя сейсмическая мощность на километр Курило-Камчатской дуги равна $\omega = 0,9 \cdot 10^{13}$ Дж/год·км дуги.

Сопоставление с сейсмическим циклом курило-камчатских и японских землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ [31] также свидетельствует о том, что к настоящему времени могут быть определены устойчивые средние величины \bar{E} и ω . Продолжительность сейсмического цикла таких землетрясений 140 ± 60 лет. Длина Курило-Камчатской дуги составляет 2050 км, длина области очага с $M = 8$ равна приблизительно 150 км. При таких условиях весь объем данных наблюдений за курило-камчатскими землетрясениями 1899—1986 гг. равноценен наблюдениям в одном месте в течение 8—9 сейсмических циклов. Вероятно, что приведенные выше значения \bar{E} и ω уже являются представительными. Имеются в виду в первую очередь относительные значения этих величин. Их абсолютные значения зависят от применяемых формул $\lg E = f(M)$.

Для сравнения приведем аналогичные цифры для Японской дуги. Длина Японской островной дуги примерно 2000 км, из которых 1100 км приходится на наиболее активную в мире северо-восточную часть дуги и 900 км на менее сейсмичную юго-западную часть дуги. График $\Sigma E(t)$ и средняя для Японии величина $\bar{E} = 2,24 \cdot 10^{16}$ Дж/год приведены в книге К. Касахара [16], где для оценки энергии использовалось несколько другое соотношение $\lg E$, Дж = $1,5 M + 4,8$. Если же вместо него применить соотношение (5), то средняя сейсмическая мощность для всей Японии получается равной $\omega = 0,71 \cdot 10^{13}$ Дж/год·км дуги. Это примерно на 20% меньше, чем для более однородной Курило-Камчатской дуги. Японская и Курило-Камчатская островные дуги имеют почти одинаковую протяженность, 2000—1500 км. Их средние сейсмические мощности также близки, но в течение последнего века, в 1889—1986 гг., в Курило-Камчатской дуге высвободилось сейсмической энергии примерно на $1/3$ часть больше, чем в Японской.

Рисунок 13 позволяет сделать некоторые приблизительные оценки сейсмической обстановки на Камчатке. Если линия тах является верхним пределом для графика $\overline{\Sigma E}(t)$, то к настоящему времени на Камчатке накопилось приблизительно $2 \cdot 10^{17}$ Дж сейсмической энергии, т. е. энергия одного землетрясения с $M = 8,5$ или пяти землетрясений с $M = 8$. Если же линия min служит нижним пределом графика $\Sigma E(t)$, то сейсмическое затишье землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ вряд ли продлится дольше, чем до 1995—2000 гг. Сравнительно спокойный период 1961—1986 гг., когда происходило обычное число слабых и средних землетрясений, с $M < 6$, но не было землетрясений с $M \geq 8$, может завершиться серией больших землетрясений.

Наиболее опасным среди них было бы большое землетрясение с очагом в ближайшей к г. Петропавловску-Камчатскому части сейсмофокального слоя. Этот вопрос затрагивался при обсуждении вертикальных разрезов вкрест сейсмофокального слоя, представленных на рис. 7, а, б. На них нанесены гипоцентры и вероятные плоскости разрыва трех последних землетрясений, вызвавших в г. Петропавловске-Камчатском колебания силой 6,5—7,5 баллов. Данные об этих землетрясениях приведены в табл. 5.

Гигантское Камчатское землетрясение 4(5).XI.1952 г. охватило огромную область на континентальном склоне глубоководного желоба размерами 600×150 км². Очаг сильного землетрясения 4(5).V.1959 г. располагался на глубинах 0—50 км в месте изгиба сейсмофокального

Балл в г. Петропавловске-Камчатском при больших землетрясениях в районе Авачинского залива

Дата	M по [21]	Глубина инструментального гипоцентра h , км	Гипоцентральное расстояние до инструментального гипоцентра r , км	Длина области очага, L , км	I , балл
4 (5).XI.1952	$8,5 \pm 0,3$	10—40	170—180	600	6—7
4 (5).V.1959	$7,6 \pm 0,3$	20	110—120	100	7—8
24.XI.1971	$7,3 \pm 0,1$	100—112	120	30	7
?	~ 8		60—80	150	8—9, ~ 9

слоя. Сильное землетрясение 24.XI.1971 г. произошло в мантии на нижней границе сейсмофокального слоя (см. рис. 2, 3, 7, *a*, *б*). Гипоцентры этих землетрясений располагались не ближе 110—120 км от Петропавловска-Камчатского, поэтому их сила здесь не превысила 7—8 баллов. Наибольшую потенциальную опасность представляет собой очаг землетрясения с $M \approx 8$, которое произошло бы на глубине 10—50 км на гипоцентральном расстоянии 60—80 км от Петропавловска-Камчатского. В этом случае сила землетрясения может значительно превзойти 7—8 баллов.

Спадание балльности с расстоянием обычно удовлетворительно описывается соотношением

$$I = bM - v \lg r + c, \quad (6)$$

где I — сила землетрясения в баллах, M — магнитуа, r — гипоцентральное расстояние, b , v , c — постоянные. Величина $b = 1,5$, $v = 3,0—4,5$ (4,5 для Курильских островов) [21]. Воспользуемся этим соотношением, делая поправки на то, что его точность снижается вблизи очагов больших землетрясений (в этом случае на продолжительность, спектр и интенсивность колебаний влияют также размеры очага, направление вспарывания разрывов, глубина очага и др.). Если бы землетрясение 4(5).V.1959 г. произошло на расстоянии 60—80 км, а не 110—120 км, то его сила была бы на 0,7—1,0 балла больше. Если бы магнитуа землетрясения 4(5).V.1959 г. равнялась 8, то сила землетрясения тоже могла возрасти на 0,3—0,5 балла. Эти оценки показывают, что сила землетрясения с $M \approx 8$ может достигать 8,5—9 баллов в Петропавловске-Камчатском, если очаг будет находиться в Авачинском заливе на гипоцентральном расстоянии 60—80 км от него (см. табл. 5).

Приведенная оценка сейсмической обстановки показывает, что изучение хода и закономерностей сейсмического процесса на Камчатке, особенно в верхней части сейсмофокального слоя в Авачинском заливе, также должно входить в число основных задач дальнейших детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах.

Среди самых интересных вопросов, которые предстоит изучать далее, находятся связи сейсмичности с активным вулканизмом и тектоникой. Данные детальных сейсмологических исследований об этих связях затрагивались при рассмотрении послонных карт эпицентров и разрезов и более подробно обсуждались в предыдущей работе, специально посвященной сейсмофокальному слою Камчатки [39]. Рисунки 3, 4, *a—д*, особенно рис. 4, *в*, подтверждают наши прежние выводы о том, что пояс действующих вулканов строго параллелен сейсмофокальному слою и протягивается над частью этого слоя, располагающейся на глубинах 150—175 км. Примечательны отдельные крупные вулканы, расположенные над более глубокой частью фокального слоя: Толбачик, Опала, Алаид (Тлб, Опл на рис. 3), и мощная вспышка вулканической деятельности в Ключевской группе вулканов, где в области сочленения с Але-

утской дугой заканчивается и круто поворачивает на север сейсмофокальный слой Курило-Камчатской дуги.

Ряд особенностей сейсмичности, в том числе продолжение в Берингово море сейсмического пояса Курило-Камчатской дуги и поворот северного окончания сейсмофокальной зоны Камчатки на север, в сторону от Алеутской дуги, не находит пока объяснения с позиций тектоники плит. Необходимы дополнительные данные о сейсмичности этого сложного тектонического узла, которые предстоит изучать вместе с данными о его строении, современных движениях, тепловом потоке и других.

В заключение авторы благодарят сотрудников Тихоокеанской сейсмической экспедиции ИФЗ АН СССР и Института вулканологии ДВНЦ АН СССР; в результате их большого и многолетнего труда был создан каталог камчатских землетрясений 1961—1986 гг., в котором содержатся основные исходные данные, использованные в представленной работе. Среди них благодарят руководителей групп обработки И. П. Кузина, А. М. Багдасарову, А. А. Годзиковскую, А. М. Кондратенко, Т. С. Лепскую, В. М. Зобина и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптекман Ж. Я., Захарова А. И., Зобин В. М., Левшин А. Л. и др. Очаги камчатских землетрясений 1971 года//Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 12. С. 37—56.
2. Атлас землетрясений в СССР (1911—1956 гг.). М.: Изд-во АН СССР. 1962. 337 с.
3. Балеста С. Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М., 1981. 134 с.
4. Бюллетени сети сейсмических станций СССР за 1957—1961 гг. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 306 с.
5. Викулин А. В., Синельникова Л. Г. Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке//Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102—106.
6. Горячев А. В. Камчатские землетрясения 4 мая и 18 июня 1959 года и геологические условия их возникновения//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1960. № 11. С. 32—44.
7. Горячев А. В. Основные закономерности тектонического развития Курило-Камчатской зоны. М.: Наука, 1966. 235 с.
8. Горячев А. В., Кириллов Ф. А., Кондорская Н. В., Ландырева Н. С., Федотов С. А. Сейсмическое районирование Камчатки и Курильских островов//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 408—433.
9. Горячев А. В., Ершов И. А., Кириллов Ф. А., Кузин И. П., Лямзина Г. А., Медведев С. В., Попова Е. В., Федотов С. А., Штейнберг В. В. О сейсмическом микрорайонировании территории Петропавловска-Камчатского//Тр. ИФЗ АН СССР. 1963. № 28 (195). С. 3—61.
10. Гусев А. А. Ошибки определения параметров очага землетрясений Камчатки//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 66—81.
11. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Усть-Камчатское землетрясение 15 декабря 1971 года//Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 172—184.
12. Дорошин П. Н. О некоторых вулканах, их извержениях и землетрясениях, бывших в американских владениях России. СПб.: Изд-во Российской АН, 1869.
13. Ежегодники: Землетрясения в СССР, 1964—1983 гг. М.: Наука, 1967—1986.
14. Землетрясения у берегов Камчатки в мае—июне 1959 г.//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. № 11. 1960. С. 32—44.
15. Известия ПЦСК. 1912. Т. 4. Вып. 1. 129 с.
16. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
17. Крашенинников С. П. Описание земли Камчатки. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 251 с.
18. Мелекесцев И. В., Брайцева О. А., Эрлих Э. Н., Шанцер А. Е. и др. Камчатка, Курильские и Командорские острова//История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1974. 439 с.
19. Мушкетов И. В. Материалы для изучения землетрясений России//Изв. РГО. Т. 27. СПб., 1891; 1899. Вып. 1; 2; 35. 81 с.
20. Мушкетов И. В., Орлов А. П. Каталог землетрясений Российской империи//Зап. РГО. СПб. Т. XXVI. 1893. 582 с.
21. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 534 с.

22. *Перрей А.* Землетрясения на севере Европы и Азии//А. Купфер. Свод магнитных наблюдений. СПб., 1846.
23. *Раутиан Т. Г.* Энергия землетрясений//Методы детального изучения сейсмичности. Тр. ИФЗ АН СССР. 1960. № 9 (179). С. 75—113.
24. *Раутиан Т. Г.* Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км//Тр. ИФЗ АН СССР. 1964. № 32 (199). С. 88—93.
25. *Ризниченко Ю. В.* Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 7. С. 969—981.
26. *Ризниченко Ю. В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент//Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9—27.
27. *Саваренский Е. Ф., Тищенко В. Г., Святловский А. Е., Добровольский А. Д., Живаго А. В.* Цунами 4—5 ноября 1952 г.//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1958. № 4. С. 107—113.
28. *Славина Л. Б., Федотов С. А.* Скорости продольных волн в верхней мантии под Камчаткой//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 188—198.
29. *Токарев П. И.* Извержение и сейсмический режим Ключевской группы вулканов. М.: Наука, 1966. 118 с.
30. *Федотов С. А.* Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии//Сейсмическое микрорайонирование. Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36 (203). С. 66—93.
31. *Федотов С. А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
32. *Федотов С. А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
33. *Федотов С. А., Багдасарова А. М.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 1897—1961 гг. по данным инструментальных наблюдений//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 7—34.
34. *Федотов С. А., Кузин И. П.* Скоростной разрез верхней мантии в области Южных Курильских островов//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 5. С. 670—686.
35. *Федотов С. А., Славина Л. Б.* Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой//Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1968. № 2. С. 8—31.
36. *Федотов С. А., Шумилина Л. С.* Развитие сейсмологических наблюдений на Камчатке//Проблемы современной сейсмологии: Голицынские чтения, 1981 г. М.: Наука, 1985. С. 71—86.
37. *Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф.* Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг.//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 9. С. 1360—1375.
38. *Федотов С. А., Багдасарова А. М., Бобков М. Ф., Кузин И. П.* Землетрясения Камчатки и Командорских островов по данным детальных сейсмологических наблюдений за период ноябрь 1961—1963 гг.//Землетрясения в СССР в 1963 году. М.: Наука, 1966. С. 167—194.
39. *Федотов С. А., Гусев А. А., Чернышева Г. В., Шумилина Л. С.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов в ней, связь с вулканизмом)//Вулканогеология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91—107.
40. *Федотов С. А., Славина Л. Б., Шумилина Л. С., Гусев А. А.* Скорости продольных волн в верхней мантии под Камчаткой//Сейсмичность и глубинное строение Сибири и Дальнего Востока. Владивосток, 1976. С. 180—189.
41. *Федотов С. А., Токарев П. И., Годзиковская А. А., Зобин В. М.* Детальные данные о сейсмичности Камчатки и Командорских островов (1965—1978 гг.)//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 35—46.
42. *Федотов С. А., Токарев П. И., Кондратенко А. М., Феофилактов В. Д.* Сейсмичность Камчатки в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг в 1969—1972 гг.//Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 7—13.
43. *Федотов С. А., Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Чепкунас К. Е.* Озерновское землетрясение и цунами 1969 г.//Землетрясения в СССР в 1969 году. М.: Наука, 1973. С. 195—208.
44. *Хасегава А., Умино Г., Такаги А.* Двухплоскостная структура глубинной сейсмической зоны в северо-восточной части Японской дуги//Матер. III Советско-японского симпозиума по геодинамике и вулканизму зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Южно-Сахалинск, 2—7 октября 1976 г. Новоалександровск, 1976. Тез. докл. Вып. I. С. 17—18.
45. *Хасегава А., Умино Г., Такаги А.* Двуслойная структура глубинной сейсмической зоны островной дуги северо-восточной Японии//Новые данные о строении коры и верхней мантии Курило-Камчатского и Японского региона. Матер. III Советско-японского симпозиума по геодинамике и вулканизму зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Владивосток, 1978. С. 68—75.

46. Черных Г. П. Землетрясение у берегов Камчатки 4 мая 1959 г.//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1960. № 11. С. 45—50.
47. Gutenberg B. Great earthquakes 1896—1903//Trans. Amer. Geophys. Union. 1956. V. 37. № 5.
48. Engdahl E. R. Relocations of intermediate depth earthquakes in the Central Aleutians by seismic ray tracing//Nature. 1973. V. 245. P. 23—25.
49. Hasegawa A., Umino N., Takagi A. Double-planned structure of the deep seismic zone in the north-eastern Japan Arc//Tectonophysics. 1978. V. 47. № 1/2. P. 43—58.
50. Perrey A. Documents sur les tremblements de terre at les phenomenes volcaniques dans l'archipel les Kuriles et an Kamchatka//Ann. Soc. d'agriculture et arts utiles. Lyon, 1864. v. 8.
51. Summary of earthquake focal mechanisms for the western Pacific-Indonesian region, 1929—1973. Published by World Data Center A for Solid Earth Geophysics. March, 1977.
52. Suzuki S., Sasatani T., Motoya Y. Double seismic zone beneath the midle of Hokkaido, Japan, in the southwestern side of the Kurile arc//Tectonophysics. 1983. V. 96. № 1/2. P. 59—76.
53. Tsumura K. Microearthquake activity in the Kanto District//Publ. for the 50th Anniversary of the Great Kante Earthquake (1923). 1973. P. 67—87.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР

Поступила в редакцию
27.VI.1987

Институт физики Земли АН СССР

УДК 551.21.032

ГОРЕЛЬЧИК В. И., ЗОБИН В. М., ТОКАРЕВ П. И.

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНОВ

Введение

SEISMICITY OF VOLCANOES, by Gorel'chik V. I., Zobin V. M., and Tokarev P. I. This paper presents general characteristics of seismicity in the region of active volcanoes and offers a classification of volcanic earthquakes and their swarms. It is noted that eruption fissures are a determining factor in the nature of seismic activity preceding the lateral and central eruptions. Regularities in the distribution of volcanic earthquake foci in time and space are described citing examples of seismic regime in volcanic regions.

(Received November 26, 1986)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Вулканическая деятельность сопровождается различными геологическими, геофизическими и геохимическими явлениями. К наиболее распространенным из них относятся сейсмические события, которые получили название вулканических землетрясений. В отличие от тектонических землетрясений, связанных с тектоническими движениями блоков земной коры и верхней мантии, вулканические землетрясения связаны с зарождением и движением магмы на глубине, а также выходом ее на поверхность Земли. Так как вулканы всегда располагаются в тектонически активных областях с повышенной сейсмической активностью, возникает проблема разделения землетрясений на вулканические и тектонические. Это решается просто, когда землетрясения непосредственно связаны с извержениями вулканов и их очаги располагаются в пределах земной коры. Землетрясения, связанные с зарождением магматических очагов и движением магмы в верхней мантии, отличить от тектонических пока невозможно.

С тех пор как в 1888 г. в вершинной зоне вулкана Бандай в Японии были впервые проведены сейсмометрические наблюдения, прошло почти 100 лет. В настоящее время сейсмологическими исследованиями охвачены вулканы большей части земного шара, от наиболее северных вулканов Исландии до самого южного вулкана Эребус в Антарктике.

В Советском Союзе систематическое изучение вулканических землетрясений начато в 1946 г. в районе Северной группы вулканов на Камчатской вулканологической станции. К 1986 г. на Камчатке действуют два радиотелеметрических куста сейсмических станций, осуществляющих совместно с региональной сетью сейсмических станций контроль за большинством активных вулканов полуострова.

Ценные результаты получены при сейсмологических исследованиях извержений вулканов Безымянный в 1955—1956 гг., Шивелуч в 1964 г. [16, 17], механизма очага вулканических землетрясений [10] Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—1976 гг. [22, 23]. Накоплен [3—5] и подлежит обобщению детальный материал по сейсмичности Ключевской группы вулканов и извержениям 1974—1987 гг. крупнейшего базальтового вулкана Евразии — Ключевского.

В предлагаемой работе на основании данных, имеющихся в литературе и полученных в результате детальных сейсмологических исследований на вулканах Камчатки, приводятся энергетические, спектральные и пространственно-временные характеристики вулканических землетрясений, их механизм и связь с вулканическими явлениями.

Общая характеристика вулканических землетрясений

Разнообразие сейсмических явлений, сопровождающих вулканическую деятельность, привело к созданию ряда классификаций вулканических землетрясений в зависимости от глубины очага, характера записи, связи с различными стадиями деятельности вулкана и других признаков [16, 17, 24, 30]. Ни одна из классификаций не является универсальной для всех вулканов и типов извержений. Тем не менее в первом приближении вулканические землетрясения можно разделить на две крупные группы (рис. 1).

К первой группе относятся землетрясения, связанные с разрушением пород под действием напряжений, возникающих при перемещении магмы в земной коре и верхней мантии. По основным характеристикам они мало отличаются или совсем не отличаются от тектонических землетрясений. Их очаги лежат на глубинах от 0 и выше ур. моря до 60 км. Землетрясения с глубиной очага в среднем более 5 км соответствуют землетрясениям I типа, а с глубиной очага менее 5 км — землетрясениям II и III типов, по классификации П. И. Токарева [16].

Землетрясения этой группы используются для изучения деформаций и напряжений в земной коре и верхней мантии в районе вулканов, оконтуривания магматических очагов и подводящих каналов, прослеживания путей движения магмы, для прогноза места и времени и энергии извержений.

Ко второй группе относятся вулканические землетрясения, непосредственно связанные с самим процессом извержения — выходом магмы на поверхность Земли и взрывами в кратере вулкана (IV и V типы, по классификации П. И. Токарева [16]). Источник (очаг) этих событий располагается преимущественно на удалении не более $0,5 \div 1$ км от активного кратера вулкана. Вулканические землетрясения второй группы (взрывные землетрясения, вулканическое дрожание) используются для изучения динамики и механизма извержений.

В настоящей статье мы будем рассматривать в основном землетрясения первой группы. Наибольшее их количество сосредоточено в земной коре в пределах первых 20—30 км глубины, и именно эти землетрясения определяют локальную сейсмичность отдельных вулканов и вулканических областей.

На основании опыта исследования вулканических землетрясений можно отметить следующие характерные особенности их проявления: а) тенденцию к возникновению групп и роев событий; б) локализацию очагов вулканических землетрясений в пределах малых объемов земной коры вблизи магматического очага и выводного канала вулкана, ведущую к существенному ограничению максимальной энергии вулканических землетрясений (максимальная магнитуда до $5,5 \div 6$); в) высокую скорость развития сейсмического процесса; г) многократное повторение подвижек по одним и тем же трещинам и разломам, по которым происходит подъем магмы к поверхности.

Это приводит к возникновению целых семейств однотипных землетрясений с идентичной формой записи (например, при извержениях вулканов Усу в 1944—1945 гг. в Японии [31], Фернандина на Галапагосских островах в 1968 г. [29], Безымянный на Камчатке в 1955—1960 гг. [16] и др.).

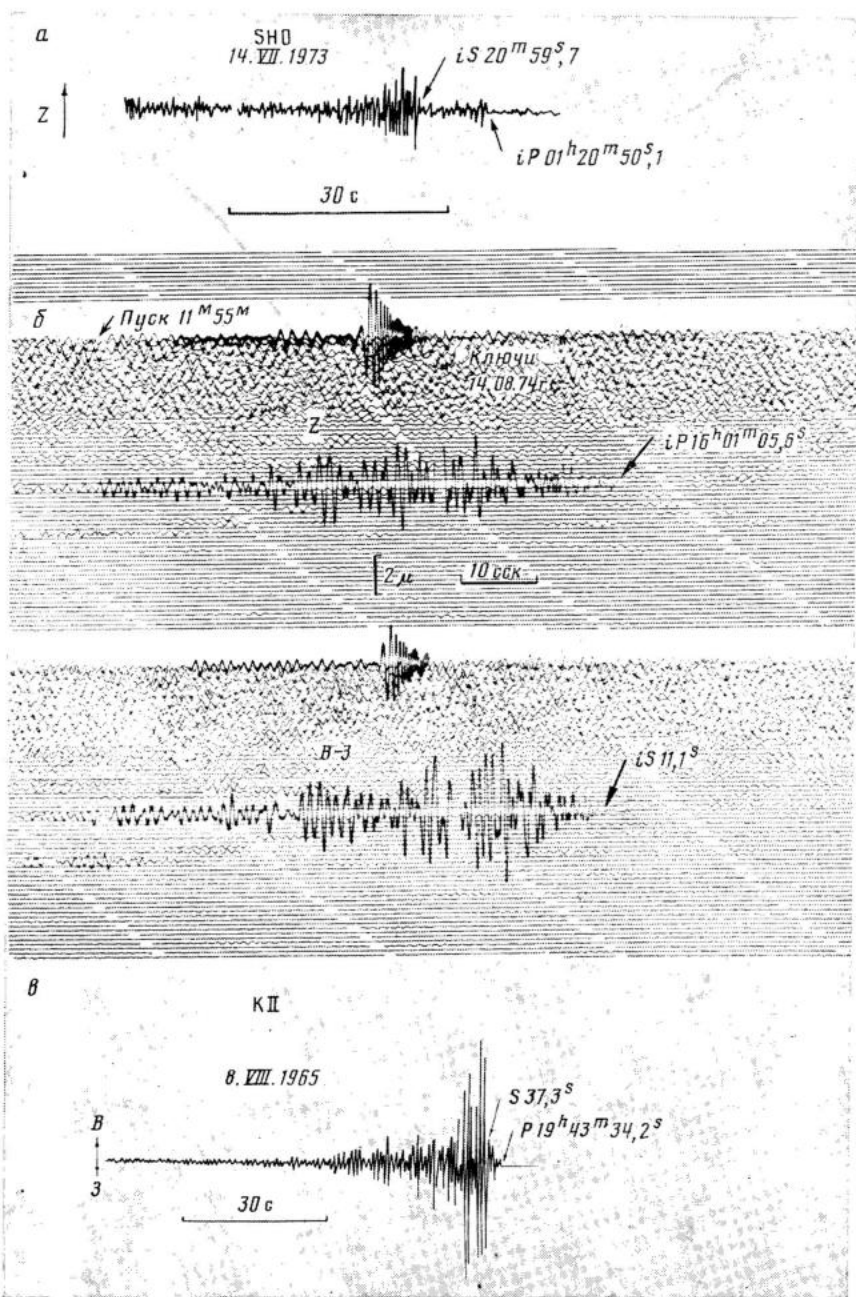


Рис. 1. Образцы записей вулканических землетрясений: а — вулканическое землетрясение I группы, глубина очага более 5 км (вулкан Тятя, о-в Кунашир, сейсмостанция Шикотан, эпицентрального расстояние 75 км); б — вулканическое землетрясение I группы, глубина очага менее 5 км; в верхней части сейсмограммы образец записи вулканического дрожания (II группа; вулкан Ключевской, Камчатка, сейсмостанция Ключи, эпицентрального расстояние 27 км); в — взрывное землетрясение II группы (вулкан Карымский, Камчатка, сейсмостанция Карымская, эпицентрального расстояние 3 км)

По характеру проявления во времени, пространственному положению и связи с деятельностью вулканов в вулканических областях (в частности, на Камчатке) выделено пять основных типов роев землетрясений [18].

Рои I типа предвворяют центральные (терминальные) извержения андезитовых вулканов. Они состоят преимущественно из поверхностных вулканических землетрясений (II и III типа, по классификации П. И. Токарева), эпицентры которых лежат на удалении примерно $3\div 5$ км от кратера, а очаги — на глубине $0\div 5$ км и выше ур. моря, в теле вулканической постройки. В зависимости от глубинного строения зон питания андезитовых вулканов возможны землетрясения с глубиной очага $10\text{—}15$ км. Предельный (максимальный) энергетический класс землетрясений роя равен $K_{\text{пред}} = 12,0 \pm 0,5$. Длятся такие рои с $K \geq 7,0$ $3\div 5$ нед, а с $K \geq 9\text{—}7\div 10$ дней. Землетрясения роя связаны с непрерывным ростом давления в верхней части выводящего канала перед извержением. При этих роях суммарная энергия E_N , частота N и максимальный энергетический класс землетрясений K^{max} возрастают непрерывно и монотонно и максимальных значений достигают в момент извержения.

Рои II типа предвворяют побочные (латеральные) извержения базальтовых и андезитовых вулканов. В этих роях также преобладают поверхностные землетрясения II и III типов, но иногда происходят и землетрясения I типа. Эпицентры землетрясений лежат на удалении $3\div 10$ км от места образования нового кратера, а очаги — на глубине не более $10\div 20$ км (в основном на глубине $0\div 5$ км). Рои землетрясений вызваны внедрением магмы и образованием на глубине трещин, по которым магма поднимается к поверхности Земли. Перед побочными извержениями центральных стратовулканов рои землетрясений длятся $1\text{—}10$ сут, а $K_{\text{пред}} = 11,0 \pm 0,5$. В этих роях E_N , N и K^{max} сначала резко возрастают и, достигнув максимума, начинают постепенно уменьшаться, а за несколько часов перед прорывом побочного кратера землетрясения с $K \geq 6,0$ прекращаются. Перед извержениями очень жидких базальтовых магм в рифтовых зонах, вблизи щитовых и трещинных вулканов рои землетрясений могут длиться часы или десятки минут, а предельная энергия землетрясений может быть значительно меньше указанной выше.

На рис. 2 проиллюстрирован ход развития сейсмической активности для I и II типов роев землетрясений, предвворяющих извержения вулканов. Характер проявления сейсмической активности достаточно стабилен, что позволяет использовать рои вулканических землетрясений для прогноза извержений вулканов [16, 17, 19].

Рои III типа сопровождают извержения вулканического типа. Они состоят из землетрясений IV (взрывного) типа. Очаги землетрясений лежат на глубине не более 500 м от дна активного кратера, а эпицентры — в кратере вулкана. Их частота N , энергия E_N и K^{max} изменяются в зависимости от интенсивности извержения и силы отдельных взрывов [21].

Рои IV типа происходят во время и в конце извержений, а также после их прекращения. Они могут состоять из вулканических землетрясений I—III типов с глубиной очага $0\text{—}30$ км и эпицентрами на удалении до $10\text{—}20$ км и даже более от активного кратера вулкана. Такие рои отражают постепенную разрядку напряжений, возникших при перемещении магмы до и во время извержения (просадку кровли над периферическим магматическим очагом, обрушение стенок кратера, отток магмы в трещины и т. п.). E_N , N и K^{max} обычно максимальны в начале роя и со временем постепенно уменьшаются. Длятся рои от нескольких часов до нескольких месяцев.

Рои V типа непосредственно с извержениями вулканов не связаны и происходят вблизи как активных, так и потухших вулканов. Иногда

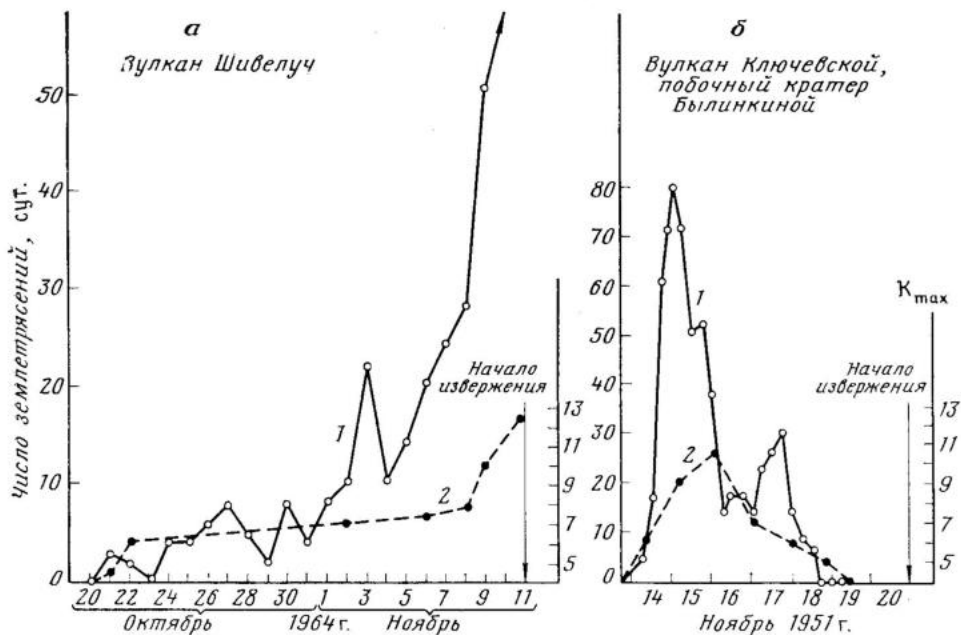


Рис. 2. Образцы развития роев вулканических землетрясений I и II типов, предвещающих извержения вулканов: а — I тип, рой вулканических землетрясений, предвещавший центральное извержение вулкана Шивелуч, Камчатка, 1964 г.; б — II тип, рой вулканических землетрясений, предвещавший побочное (латеральное) извержение вулкана Ключевского, Камчатка, 1951 г.; 1 — число землетрясений/сут; 2 — максимальный энергетический класс

подобные рои происходят в районах затухающего вулканизма, вдали от вулканов. Рои состоят из вулканических землетрясений I типа. Их очаги лежат на глубинах 5–40 км, а эпицентры — в пределах морфологически выраженной вулканической постройки. Предельный энергетический класс землетрясений роя может достигать $K=12,0$. Длятся такие рои от нескольких часов до нескольких суток и даже месяцев. Иногда в одном и том же месте рои землетрясений повторяются многократно в течение нескольких лет с перерывом между ними в несколько месяцев или лет. Развитие этих роев во времени в общих чертах подобно развитию роев II типа.

Механизм и очаговые параметры вулканических землетрясений

Как показали работы советских и зарубежных авторов [9, 10, 28, 32], механизм очага достаточно сильных вулканических землетрясений (начиная с девятого энергетического класса) подобен механизму очага тектонических землетрясений такой же силы, т. е. и тектонические, и вулканические землетрясения происходят в результате сдвигового перемещения пород в недрах Земли. Квадрантное распределение знаков смещений в первых вступлениях P -волн, соответствующее источнику типа двойного диполя без момента, наблюдалось для землетрясений вулканов Шивелуч, Новые Толбачинские (Камчатка), Мияке-Сима, Усу (Япония), Сент-Хеленс (США) и др.

При изучении механизма очага вулканических землетрясений, предвещавших ряд побочных извержений (вулканы Ключевской, Новые Толбачинские, Тятя, Мияке-Сима и др.), было обнаружено, что направление одной из возможных поверхностей разрыва в очагах землетрясений совпадает или близко к простиранию возникающей при побочных изверже-

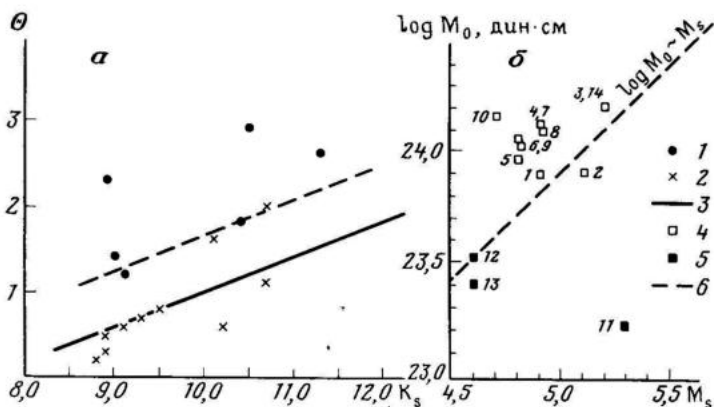


Рис. 3. Соотношение очаговых параметров вулканических землетрясений, связанных с центральными и латеральными извержениями вулканов: *a* — зависимость параметра $\theta = K_s - K_p$ от энергетического класса K_s для вулканических землетрясений: 1 — для латеральных, 2 — для центральных извержений вулкана Алайд; 3 — корреляционная зависимость θ от K_s для тектонических землетрясений, по С. А. Федотову; *b* — соотношение сейсмического момента и магнитуды для сильных вулканических землетрясений: 4 — при центральных извержениях вулканов; 5 — при латеральных; 6 — линии разграничения (проведены условно). Номера точек соответствуют нумерации в табл. 2 [11]

ниях эруптивной трещины, на которой образуются новые побочные конусы [10]. Это обстоятельство позволило отождествить очаги относительно сильных вулканических землетрясений с трещинами, формирующимися в процессе подготовки побочных извержений, по которым в земной коре осуществляется подъем магмы к поверхности Земли. Было высказано предположение, что характеристики очагов сильных вулканических землетрясений и особенности развития роев вулканических землетрясений зависят от специфики формирования эруптивных трещин вулканов.

Так, на основании оценок очаговых параметров сильных вулканических землетрясений (сейсмического момента, размеров очага, сброшенного напряжения), проведенных по спектральным характеристикам объемных и поверхностных волн, было показано, что очаги вулканических землетрясений характеризуются более интенсивным длиннопериодным излучением по сравнению с тектоническими землетрясениями той же магнитуды. Это нашло отражение в относительно повышенных значениях сейсмических моментов очагов вулканических землетрясений [10]. В рамках представлений об очагах вулканических землетрясений как подвижках в пределах эруптивной трещины это означает, что формирование очагов вулканических землетрясений происходит в результате подвижек более «гладких» бортов трещины, чем при среднем тектоническом землетрясении. Оцененные по спектрам *P*-волн размеры очагов сильных вулканических землетрясений, возникающих при подготовке побочных извержений, сопоставлялись с протяженностью эруптивных трещин, выходящих на поверхность в процессе этих извержений. Как оказалось, во всех случаях (было рассмотрено пять извержений вулканов: Мияке-Сима, 1962; Бееренберг, 1970; Алайд, 1972; Тятя, 1973; Новые Толбачинские, 1975) длина эруптивной трещины на поверхности не превышает размеров очага землетрясения. Протяженность разрыва в очаге землетрясения является, по-видимому, определенным ограничителем размеров трещины [10].

Далее, при сопоставлении спектральных характеристик волн, излучаемых землетрясениями, связанными с центральными и побочными извержениями, было получено, что в первом случае (т. е. при центральных извержениях) очаги землетрясений характеризуются более интен-

сивным длиннопериодным излучением и относительным преобладанием интенсивности продольных волн [11]. Проиллюстрируем эти факты на примере двух классов роев вулканических землетрясений вулкана Алайд (рис. 3, а) и ряда сильных землетрясений вулканов мира (рис. 3, б). На рис. 3, а видно, что параметр $\theta = K_s - K_p$ (K_s и K_p — энергетические классы, оцененные по интенсивности излучения поперечных и продольных волн) существенно выше при равном классе K_s для роя землетрясений, связанных с латеральным извержением вулкана Алайд 1972 г., по сравнению с роем землетрясений центрального извержения того же вулкана в 1981 г. Рисунок 3, б демонстрирует наличие повышенных величин сейсмических моментов при фиксированной магнитуде для роев землетрясений при центральных извержениях ряда вулканов мира. Различия уровня излучения различного типа сейсмических волн при землетрясениях побочных и центральных извержений в статье [11] интерпретируется как следствие различного способа формирования магистрального разрыва — очага землетрясения. Предполагается, что при центральных извержениях может происходить «оживление» уже существовавшей эруптивной трещины, а при латеральных извержениях — заложение новой. В этом случае разрыв по уже существующей трещине будет происходить более «гладко», что приведет к формированию более интенсивного длиннопериодного излучения.

Пространственно-временные характеристики проявления сейсмичности вулканов

Пространственное распределение очагов землетрясений в районе вулкана или группы вулканов обусловлено конкретной геолого-структурной обстановкой и глубинным строением зон магматического питания.

Размеры эпицентральных областей, в которых проявляется сейсмическая активность того или иного вулкана, составляют по площади десятки, первые сотни квадратных километров. Землетрясения в большинстве случаев локализованы вокруг активного кратера или будущего нового эруптивного центра, что позволяет прогнозировать место извержения. Иногда очаги землетрясений мигрируют вдоль системы приповерхностных разломов в направлении перемещения магмы. Такие явления наблюдаются на вулкане Килауэа на Гавайских островах [25], в Исландии на вулкане Крафла, где магма из кальдеры вулкана может перетекать в горизонтальном направлении на расстояние до 65 км [26]. Сейсмоактивные области в таких случаях имеют форму, вытянутую в каком-то одном направлении, а новые центры извержений возникают в головной части фронта сейсмической активности. Сейсмичность групп активных и потухших вулканов, образующих так называемые долгоживущие вулканические центры с единой системой питающих магматических очагов [14], складывается из совокупности сейсмоактивных зон, существующих в пределах центра, и может охватывать территорию в несколько тысяч квадратных километров.

В качестве примера остановимся несколько подробнее на особенностях сейсмичности района Ключевской группы вулканов, или Ключевского долгоживущего вулканического центра. Ключевской вулканический центр объединяет около 20 крупных вулканических аппаратов четвертичного возраста [13] и характеризуется наивысшей активностью вулканических процессов в новейшее и современное время. Как видно из карт эпицентров на рис. 4, основная сейсмичность в земной коре в районе Ключевской группы вулканов сосредоточена в нескольких сейсмоактивных зонах, выделяемых по сгущениям эпицентров [3]. Положение сейсмоактивных зон контролируется размещением вулканов, в первую очередь действующих: Ключевского (Центральная зона вокруг

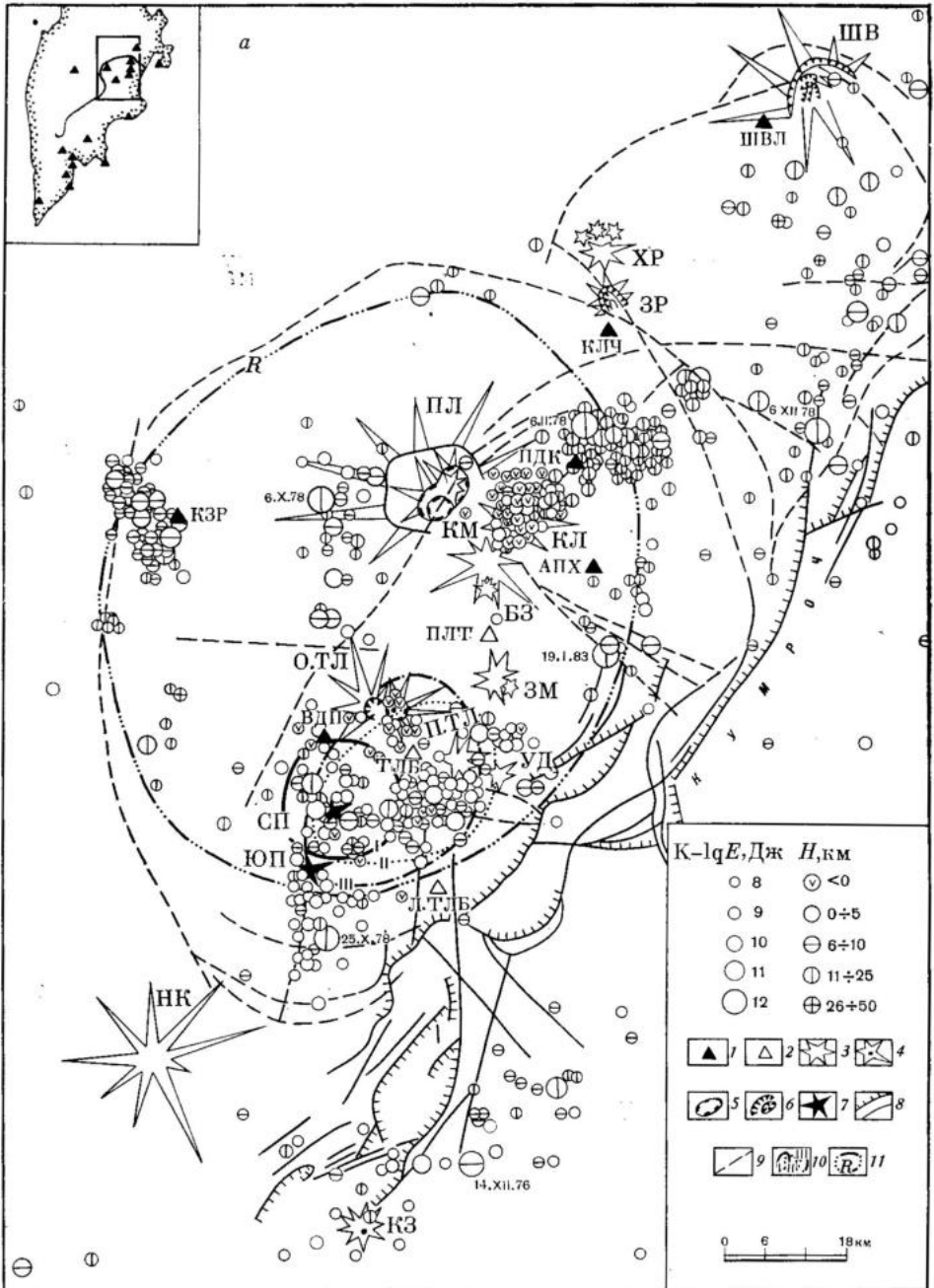


Рис. 4, а

вершинного кратера), Безымянного (Безымянная зона) и Плоского Толбачика (Толбачинская зона), а также структурными особенностями района — разломами северо-восточного и северо-западного простирания (зоны вблизи сейсмостанций Подкова, Апахончич, Козыревск, см. рис. 4).

Сейсмичность зон, в которых расположены вулканы, непосредственно связана с вулканической деятельностью. При этом обнаруживается несколько различных характер распределения землетрясений по глубине под вулканами с различным строением зон питания и соответствен-

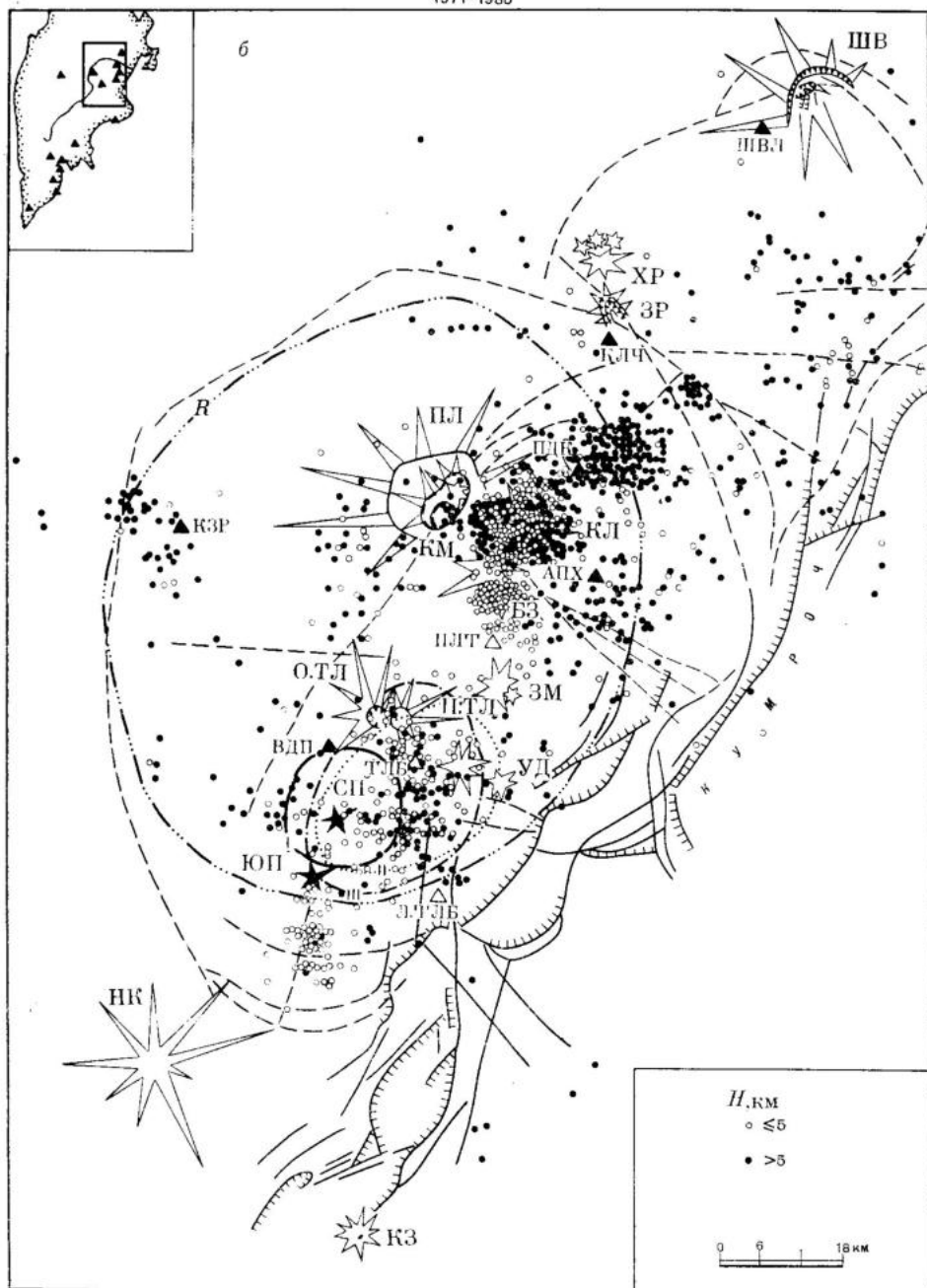


Рис. 4. Карты эпицентров землетрясений с $H \leq 30$ км, $K \geq 7,5$ (а) и $K < 7,5$ (б) для района Ключевской группы вулканов за 1971—1985 гг. Сейсмические станции: 1 — постоянные, 2 — временные; 3 — потухшие вулканы: ХР — Харчинский, ЗР — Заречный, ПЛ — Ближний и Дальний Плоские, КМ — Камень, ЗМ — Зимины, УД — Удины, О. ТЛ — Острый Толбачик, НК — Николка; 4 — действующие вулканы: ШВ — Шивелуч, КЛ — Ключевской, БЗ — Безымянный, П. ТЛ — Плоский Толбачик, КЗ — Кизимен; 5 — кальдеры; 6 — кратеры вулканов; 7 — Северный (СП) и Южный (ЮП) Прорывы БТИ; тектонические нарушения: 8 — установленные, 9 — предполагаемые; 10 — контуры эпицентральных областей роев землетрясений, предварявших образование конусов Северного и Южного Прорывов БТИ: I — с 27.VI по 5.VII.1975 г., II — с 2 по 17.VIII.1975 г., III — с 1 по 17.XI.1975 г.; 11 — контур области, под которой предполагается существование системы магматических промежуточных очагов, питающих Ключевскую группу вулканов

но разным химическим составом лав, а также различный характер временных соотношений сейсмичности с вулканической активностью на разных по глубине структурных этажах земной коры.

В зонах проявления современного базальтового вулканизма (Центральная зона, в которой происходят вершинные и побочные извержения Ключевского вулкана; Толбачинская зона, охватывающая кроме вулкана Плоский Толбачик область развития юго-западных шлаковых конусов, где время от времени возникают трещинные извержения) сейсмическая активность наблюдается во всем интервале глубин от 0 до 30 км. В верхних горизонтах земной коры, на глубинах менее 5 км, наибольшее количество землетрясений возникает главным образом при подготовке (краткосрочные предвестники) и во время извержений. В остальные периоды уровень сейсмичности на этих глубинах очень низок. В средних и нижних горизонтах земной коры под Центральной и Толбачинской зонами сейсмическая активность обнаруживает корреляцию не только с извержениями, но и более глубокую связь с вулканическим процессом в целом, включая процессы в магматическом канале и очаге или системе очагов [3, 12, 22]. Землетрясения с глубиной очага более 5 км могут происходить при любом состоянии вулкана, но преобладающее их число регистрируется, как правило, в периоды между извержениями, предвеляя усиление извержения вершинного кратера или побочные извержения за время от нескольких месяцев до года (среднесрочные предвестники) [5].

В зоне проявления андезитового вулканизма, на вулкане Безымянный, сейсмическая активность, связанная с ростом и разрушением экстрезивного купола, в последние 15 лет была относительно невысокая ($K^{\max}=8$) и сосредоточена на небольшой глубине, в основном выше ур. моря (см. рис. 4, б). Землетрясения с глубиной очага более 5 км под вулканом редки. Вероятный нижний предел глубины очагов землетрясений в земной коре здесь, по-видимому, ограничен кровлей крупного, размером 10×16 км, магматического очага, устанавливаемого, по данным ГСЗ, в интервале глубин 10—20 км [1]. Так же как и на вулкане Ключевской, поверхностная сейсмическая активность вокруг вулкана Безымянный обычно предвеляет и сопровождает извержения.

В других сейсмоактивных зонах Ключевского центра, удаленных от кратеров действующих вулканов на расстояние до $20 \div 30$ км и более, поверхностных землетрясений немного, преобладают события с глубиной очагов $10 \div 20$ км. В основном они проходят без видимой связи с извержениями, но при некоторых крупных извержениях может наблюдаться повышение уровня сейсмической активности в пределах всего вулканического центра. Так, при подготовке и развитии Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) в июне—сентябре 1975 г. площадь, захваченная сейсмическими подвижками, первоначально составляла ~ 400 км². Во время и после извержения этого одного из крупнейших извержений нашего века произошло оживление на территории около 5000 км² (контур R на рис. 4) [22, 23]. Расширение сейсмичности по площади происходило дважды: в 1975—1976 гг. и в 1976—1978 гг. [23]. Скорость распространения сейсмической активности в стороны от района извержения оценивается в $1,95 \pm 0,35$ км/мес¹. По-видимому, в процесс Толбачинского извержения были вовлечены не только магматические очаги под Северным и Южным Прорывами и Плоским Толбачиком, но и вся система очагов, питающих Ключевскую группу вулканов, существование которой предполагается в нижних горизонтах коры или в слое, переходном от коры к мантии. В результате извержения, при котором был образован покров площадью около 36 км², очевидно, возникли деформации и растрескивание кровли над промежуточными оча-

¹ Расчеты выполнены аспирантом МГУ А. С. Коповым.

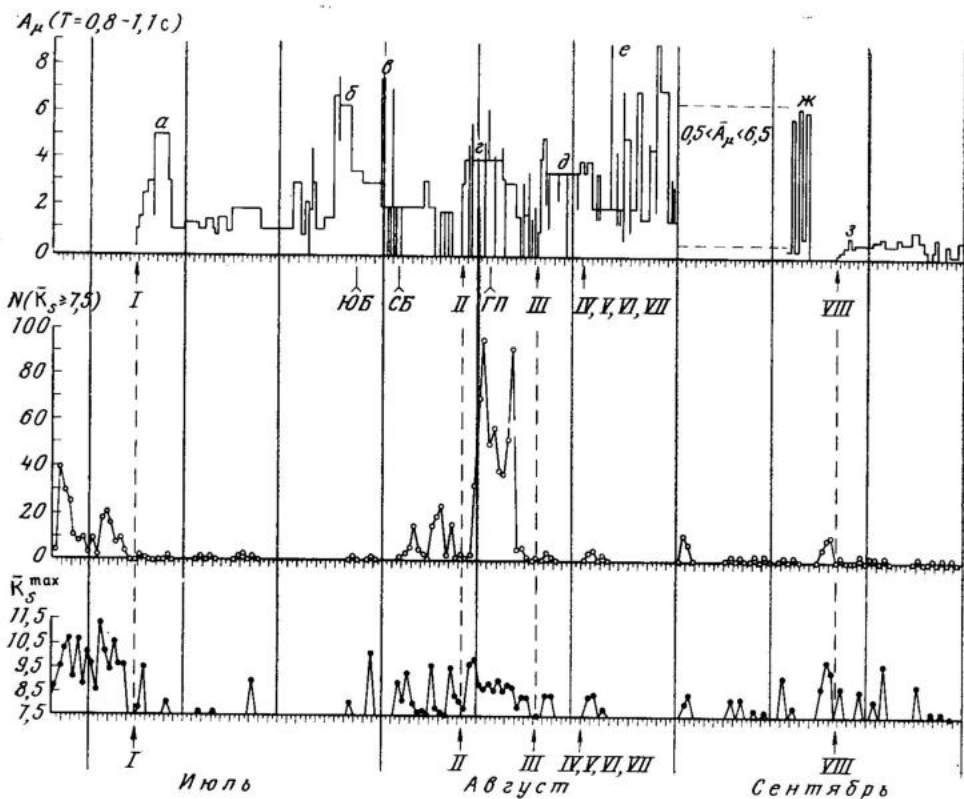


Рис. 5. Графики изменения во времени средней амплитуды A_{μ} вулканического дрожания на сейсмостанции Толбачик, числа N землетрясений с $K_s \geq 7,5$ за период с 27.VI по 30.XI.1975 г. Стрелками показано время образования конусов извержения; ЮБ, СБ и ГП — прорыв Южной и Северной боков I конуса и главного потока II конуса

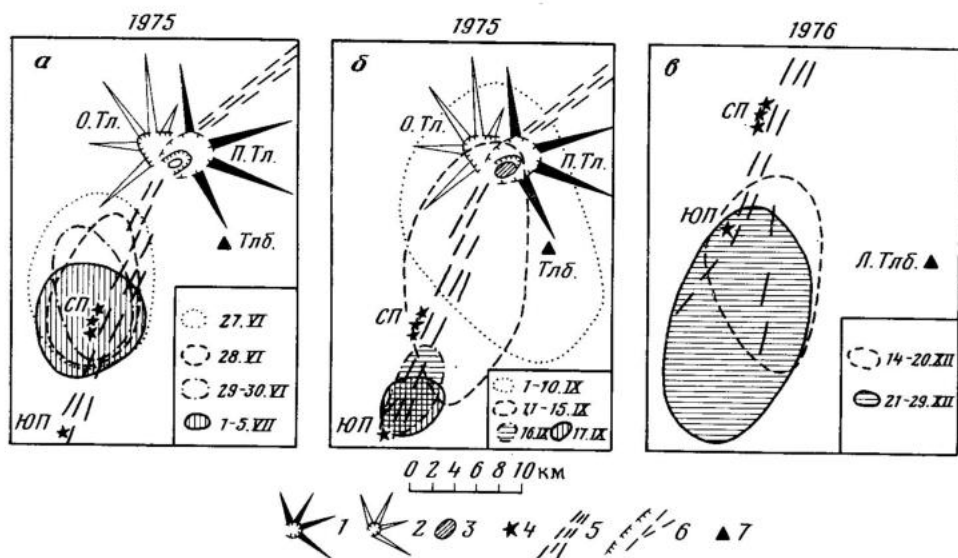


Рис. 6. Положение эпицентральных зон роев землетрясений БТИ относительно центров извержений и их развитие в пространстве в процессе роя: 1 — действующие вулканы; 2 — потухшие вулканы; 3 — провал в кратере Плоского Толбачика; 4 — центры извержений; 5 — зона развития ареального вулканизма; 6 — тектонические нарушения; 7 — сейсмические станции

гами, что привело к распространению сейсмической активности на весь район Ключевской группы вулканов.

Временные соотношения между вулканическими и сейсмическими явлениями. Для каждого конкретного вулкана выделяются периоды покоя, подготовки и развития извержения, которым соответствуют определенные характеристики сейсмической активности. На рис. 5 показано изменение некоторых характеристик сейсмической активности при подготовке и развитии БТТИ [23]. За несколько суток до образования крупных конусов Северного и Южного Прорывов в месте их возникновения происходили рои землетрясений, по развитию которых во времени и в пространстве были успешно предсказаны начало извержения и его дальнейший ход [23]. Сильная эксплозивно-эффузивная деятельность Северного Прорыва сопровождалась интенсивным вулканическим дрожанием и взрывными землетрясениями. Изменение амплитуды вулканического дрожания (см. рис. 5) отражало перестройку динамического режима извержения [23]. Нарастание эксплозивной активности в начале извержения сопровождалось увеличением амплитуды дрожания. Когда помимо эксплозивной деятельности началось излияние лавы, появилось дрожание с резкими перепадами амплитуды колебаний (от 0,2 до 5÷6 мкм на расстоянии 13 км от активного кратера). Монотонное, в течение 479 дней, излияние лавы на Южном Прорыве сопровождалось умеренным вулканическим дрожанием при почти полном отсутствии землетрясений.

Различие в механизме извержений может сказываться на пространственно-временном развитии сейсмической активности в районе вулкана. На рис. 6 показано положение эпицентральных зон роев землетрясений, происходивших накануне образования Северного и Южного Прорывов в июне — июле и сентябре 1975 г. и после завершения извержения в декабре 1976 г., относительно центров извержений и изменение положения этих зон в пространстве в процессе каждого роя. Во время подготовки Северного Прорыва эпицентральные области на всех стадиях развития роя располагались вокруг конусов Северного Прорыва. В рое, предвалявшем образование Южного Прорыва (см. рис. 6, б), наблюдалось смещение эпицентральных областей в направлении на юго-запад от кратера Плоского Толбачика и Северного Прорыва. Южный Прорыв возник на юго-западной окраине предваляющего роя. Предполагается [23], что Северный Прорыв образовался в результате подъема магмы к поверхности из нижних горизонтов коры или слоя, переходного от коры к мантии, где располагаются магматические очаги, питающие Плоский Толбачик и зону шлаковых конусов, в которой произошло БТТИ. В случае Южного Прорыва внедрение базальтов происходило не снизу вверх, а шло под уклон из района Северного Прорыва по трещинам, рост которых сопровождался роем землетрясений. После окончания Толбачинского извержения, в декабре 1976 г., возник рой землетрясений, вероятно, связанный с внедрением магмы дальше на юг от Южного Прорыва. И снова области эпицентров этого роя (см. рис. 6) обнаружили смещение одна относительно другой с северо-востока на юго-запад в направлении предполагаемого внедрения.

Таким образом, пространственно-временные характеристики распределения сейсмичности в районе вулканов содержат информацию о месте, времени, механизме извержений, а также о глубинном строении зон питания вулканов.

Параметры сейсмического режима

Параметры сейсмического режима вулканов и вулканических центров обладают рядом особенностей, обусловленных характером проявления сейсмичности, связанной с вулканической деятельностью.

Сейсмическая активность. Распределение сейсмической активности, как и распределение очагов вулканических землетрясений, носит локальный характер.

На рис. 7 приведены карты сейсмической активности, построенные для района Ключевской группы вулканов в периоды задолго до (1971—26.VI.1975 гг) и во время подготовки и развития БТТИ (27.VI—17.IX.1975 г.). В качестве меры сейсмической активности была выбрана активность A_8 , соответствующая числу землетрясений восьмого энергетического класса, происходящих в год на площади 100 км² [7].

Как видно на рис. 7, сейсмическая активность A_8 в районе извержения в июне—сентябре 1975 г. увеличилась по сравнению с периодом покоя на три порядка. Максимальные значения A_8 были сосредоточены в радиусе 10 км от конусов Северного и Южного Прорывов. При этом убывание сейсмической активности до фоновых значений происходило резко, на расстоянии всего 20—25 км.

Графики повторяемости вулканических землетрясений. Для землетрясений с глубиной очага 10—30 км долговременные значения угла наклона графика повторяемости $\gamma=0,4—0,5$, т. е. примерно такие же, как и для тектонических землетрясений [7, 17]. Для землетрясений, происходящих в верхних горизонтах земной коры и в вулканической постройке, коэффициент γ варьирует в широких пределах, от 0,5—0,6 до 1,5—2,5, что связано с резкой неоднородностью физических свойств пород и изменчивостью поля напряжений вблизи вулкана. Эти данные хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями процессов разрушения, при которых выявлена прямая связь между величиной γ и степенью неоднородности образцов [2].

В целом для сейсмического режима активных вулканических областей, где преобладает роевая сейсмичность с большим количеством поверхностных и относительно слабых событий, характерны повышенные средние значения наклона графика повторяемости по сравнению с тектоническими районами.

Величина коэффициента γ изменяется в пространстве и во времени в зависимости не только от физических свойств земной коры, но и от характера процессов, происходящих в сейсмоактивных зонах под вулканом и в пределах всего вулканического центра.

Резкие площадные изменения наклона графика повторяемости отмечались в различных сейсмоактивных зонах, возникших в ходе Толбачинского извержения. Среднее значение γ для района Ключевской группы вулканов, подсчитанное по землетрясениям с $K \geq 7,5$ за период подготовки и развития БТТИ (27.VI—17.IX.1975 г.), составляло 0,7 [7]. В районе извержения в это время существовали зоны пониженных (0,4—0,5) и повышенных (1,2—2,5) относительно среднего для всего района значений γ [6] (рис. 8). Пониженные значения γ соответствовали району Северного и Южного Прорывов, где в период образования новых вулканов напряжение возрастало. Высокие значения γ отмечались в районе вулкана Плоский Толбачик, где шло обрушение вершинного кратера в результате оттока магмы и падения напряжения в магматическом очаге под вулканом.

Во многих роях вулканических землетрясений, предвалявших извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. [20], прорыв побочных кратеров им. Б. И. Пийпа на Ключевском вулкане в 1966 г., образование Северного и Южного Прорывов БТТИ в 1975 г. [7], подводное дацитовое извержение в зоне рифа Куракоа в 1973 г. [27] и др., отмечено понижение величины γ перед возникновением наиболее сильного землетрясения в рое.

Графики повторяемости взрывных землетрясений имеют нелинейную форму. По данным наблюдений на вулкане Карымский [17—19] было установлено, что зависимость $N(K)$ в двойном логарифмическом мас-

1971 - 26.VI. 1975

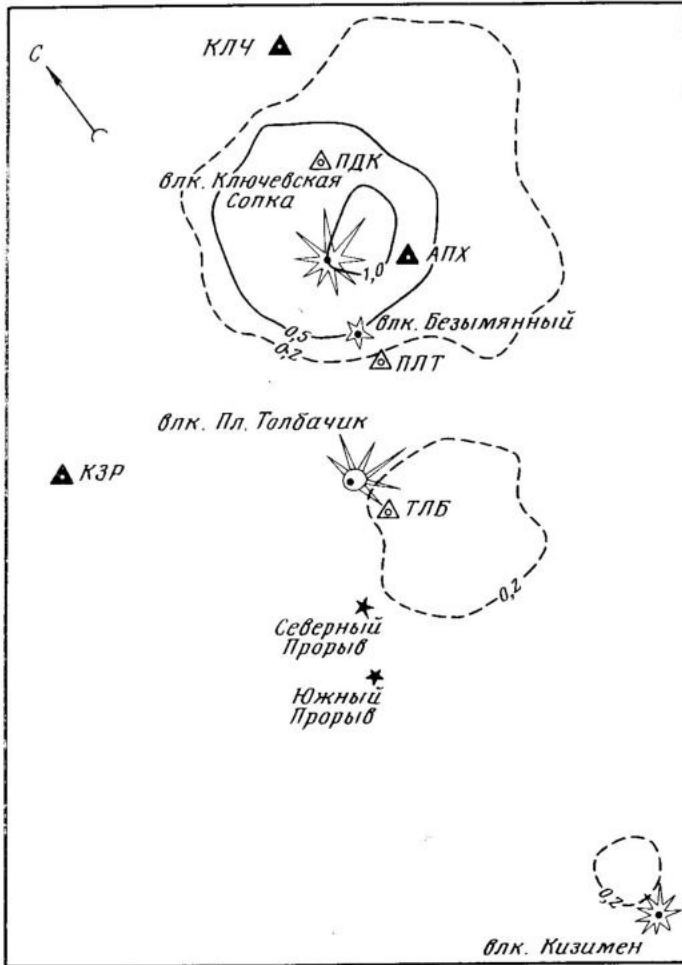


Рис. 7

штабе наилучшим образом аппроксимируется параболой. Параболическая форма графиков повторяемости взрывных землетрясений с максимумом при определенных значениях энергетического класса и резкое их отличие от графиков повторяемости тектонических и вулканических землетрясений объясняется тем, что взрывные землетрясения связаны не со сдвиговыми движениями пород в очаге, а со взрывами газов в канале вулкана. Наличие максимума на графике указывает, что в жерле вулкана при определенной скорости поступления вещества (магмы или газов) из глубины создаются оптимальные условия для возникновения взрыва и чем больше отклонения от этих условий, тем меньше вероятность взрыва.

Параметр плотности сейсмогенных разрывов $K_{ср}$ введен в сейсмологическую практику сравнительно недавно [15] как модификация концентрационного критерия разрушения твердых тел, величина которого определяется отношением среднего расстояния между трещинами к их средней длине в некотором сейсмоактивном объеме [8].

Значения параметра плотности сейсмогенных разрывов, рассчитанные за период с 27.VI по 17.IX 1975 г. для районов Северного и Южного Прорывов БТИ и для кратера Плоского Толбачика лежат в пределах 5—10 [6], т. е. близки к аналогичным оценкам, полученным в лабора-

27.VI - 17.IX.1975

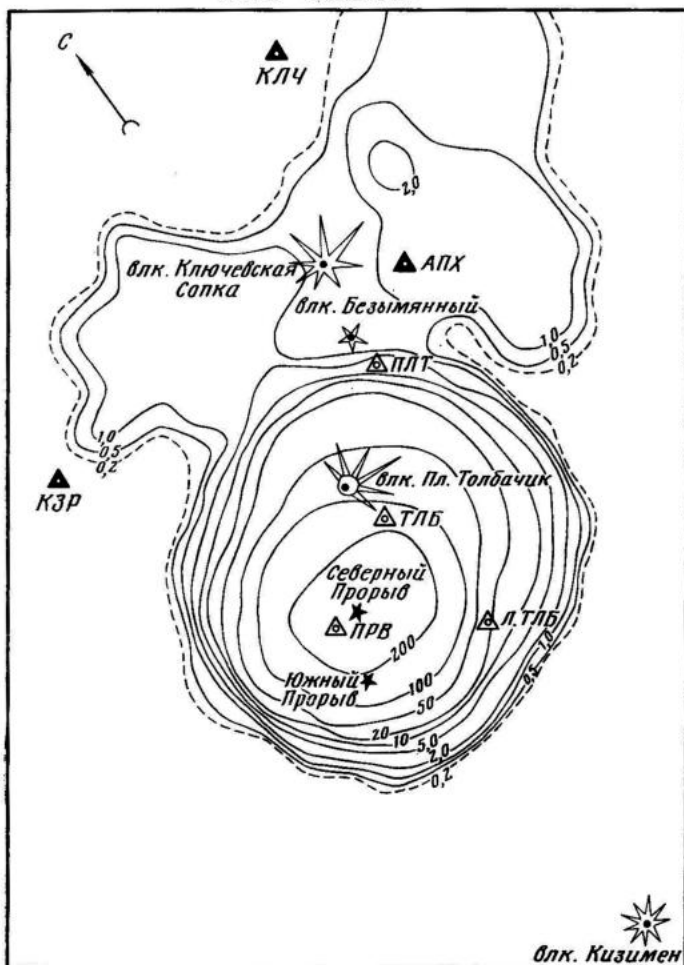


Рис. 7. Карты сейсмической активности A_8 для района Ключевской группы вулканов за периоды с 1971 по 26.VI.1975 г. и с 27.VI по 17.XI.1975 г. ПДК — Подкова; АПХ — Апахончич; ПЛТ — Плотина; ТЛБ — Толбачик; КЗР — Козыревск; ПРВ — Прорыв; КЛЧ — Ключи

торных условиях для некоторых модельных материалов и горных пород [8], а также перед сильными землетрясениями Камчатки [15].

Было показано, что, как и при сильных тектонических землетрясениях, макроразрушение среды, происходящее при образовании магмоподводящих каналов на Северном и Южном Прорывах БТТИ или при обрушении вершинной кальдеры Плоского Толбачика, предваряется и сопровождается накоплением разрывов в некотором объеме горных пород. Это приводит к формированию в местах разрушения зон пониженных значений $K_{ср}$. Как и области повышенной сейсмической активности А, зоны пониженных значений параметра плотности сейсмогенных разрывов на вулканах характеризуются более локальными размерами по сравнению с аналогичными зонами в тектонически активных районах.

Заключение

Основными особенностями сейсмичности, связанной с магматической деятельностью, имеющей выход на поверхность (извержения вулканов), или интрузивной, являются: локальный и преимущественно роевый ха-

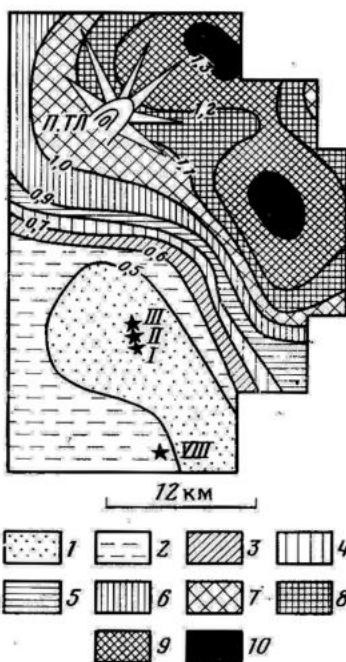


Рис. 8. Карта значений γ для района Большого трещинного Толбачинского извержения за период с 27.VI по 18.IX 1975 г. П. ТЛ — кратер вулкана Плоский Толбачик; звездочками обозначены конусы Северного Прорыва (I, II, III) и Южного Прорыва (VIII). Области значений γ : 1 — 0,41—0,50; 2 — 0,51—0,60; 3 — 0,61—0,70; 4 — 0,71—0,80; 5 — 0,81—0,90; 6 — 0,91—1,00; 7 — 1,01—1,10; 8 — 1,11—1,20; 9 — 1,21—1,30; 10 — >1,30

рактиер возникновения землетрясений; повторение групп и роев землетрясений в одних и тех же сейсмоактивных зонах; большое количество поверхностных и относительно слабых событий; наличие более длиннопериодного излучения очагов вулканических землетрясений по сравнению с тектоническими землетрясениями такой же силы.

Специфика очагов вулканических землетрясений связана с природой эруптивных трещин, по которым осуществляется подъем магмы к поверхности. Отмечается ряд отличительных особенностей параметров сейсмического режима вулканов: малая величина предельной магнитуды (до 5,5—6); локализация участков повышенной сейсмической активности *A* и ее резкий спад по мере удаления от вулкана, сравнительно высокая величина наклона графика повторяемости.

В то же время сходство в поведении наклона графика повторяемости вулканических землетрясений и параметра плотности сейсмогенных разрывов в процессе подготовки и развития извержений и перед сильными землетрясениями, и при разрушении образцов в лабораторных условиях, а также сдвиговый характер подвижек в очагах вулканических и тектонических землетрясений являются подтверждением предположения об аналогии процессов разрушения на разных масштабных уровнях, управляемых одним и тем же физическим механизмом. Отмеченное обстоятельство делает исследование сейсмического режима вулканов и процесса формирования эруптивных трещин важным с точки зрения не только прогноза извержений и изучения физики вулканического процесса, но и позволяет использовать вулканы как своего рода «природные лаборатории» для наблюдения за процессами разрушения и растрескивания горных пород в естественных условиях.

В заключение авторы выражают признательность С. А. Федотову за полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балеста С. Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 133 с.
2. Виноградов С. Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. М.: Наука, 1964. 84 с.
3. Горельчик В. И. Сейсмическая активность Ключевского вулкана в период подго-

- говки и развития прорыва Предсказанный в марте — июне 1983 г.//Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 71—87.
4. Горельчик В. И. Развитие побочных извержений Ключевского вулкана 1974, 1980 и 1983 гг. по сейсмологическим данным//Вулканическая деятельность, ее механизм, связь с геодинамикой, прогноз извержений и землетрясений: Тез. докладов VI Все-союз. вулканол. совещания. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 206—208.
 5. Горельчик В. И. Сейсмичность района Ключевой группы вулканов и связь сейсмических и вулканических явлений на Ключевском вулкане, 1971—1983//Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке: Тез. докл. выездной сессии МСССС и VI науч. сессии Дальневост. секции МСССС. Петропавловск-Камчатский, 1986. С. 25—26.
 6. Горельчик В. И., Завьялов А. Д. Поведение параметра плотности сейсмогенных разрывов при подготовке и развитии Большого трещинного Толбачинского извержения//Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 60—66.
 7. Горельчик В. И., Зобин В. М., Чубарова О. С. Сейсмичность и динамические характеристики очагов землетрясений в районе Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975—1976 гг.//Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 73—98.
 8. Журков С. Н. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел//Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 78—86.
 9. Зобин В. М. Механизм вулканических землетрясений, связанных с извержением вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г.//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. № 3.
 10. Зобин В. М. Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с.
 11. Зобин В. М. О соотношении очаговых параметров вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях вулканов//Вулканология и сейсмология. № 2. 1987. С. 85—95.
 12. Иванов Б. В., Андреев В. А., Горельчик В. И. и др. Извержение Ключевой сопки в 1972—1974 гг. и образование побочных кратеров на юго-западном склоне вулкана//Геодинамика и вулканизм островных дуг северо-западного сектора Тихоокеанского кольца. М.: Сов. радио, 1978. С. 90—104.
 13. Кожемяка Н. Н. Долгоживущие вулканические центры в системе новейших вулканических зон Камчатки//Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 4—13.
 14. Масуренков Ю. П. Вулканы над интрузиями. М.: Наука, 1979. 220 с.
 15. Соболев Г. А., Завьялов А. Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов//Докл. АН СССР. 1980. Т. 252. № 1. С. 69—71.
 16. Токарев П. И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевой группы. М.: Наука, 1966. 120 с.
 17. Токарев П. И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. С. 164.
 18. Токарев П. И. Асачинский рой землетрясений и его природа//Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 3—13.
 19. Токарев П. И. Предвестники вулканических извержений//Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108—119.
 20. Токарев П. И., Горельчик В. И. Сейсмический режим вулканов и прогноз извержений//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. М.: Наука, 1974. С. 161—166.
 21. Токарев П. И., Фирстов П. П. Сейсмологические исследования вулкана Карымско-го//Бюл. вулканол. станций. 1967. № 43. С. 9—22.
 22. Федотов С. А. Большие трещинные извержения, их теория. Механизм Толбачинского извержения//Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984.
 23. Федотов С. А. и др. Сейсмологические данные о механизме и развитии извержения//Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. С. 389—448.
 24. Davison C. A manual of seismology. L.: Cambridge Univ. Press, 1921.
 25. Decker R. W. State of the art in volcano forecasting//Geophysical Predictions. Wash., 1978. P. 47—57.
 26. Einarsson P., Branddottir B. Seismological evidence for lateral magma intrusion during the July 1978 deflation of the Krafla volcano in NE Iceland//J. Geophys. Res. 1980. V. 47. P. 160—165.
 27. Gibowicz S. J., Latter J. H., Sutton G. K. Earthquake swarm associated with volcanic eruption, Sauracoa Reef Area, Northern Tonga, July 1973//Ann. Geofis. 1974. V. XXVII. № 3—4. P. 443—475.
 28. Harada T. Stress field in Usu volcano deduced from focal mechanism solutions//Bull. Volcanol. Soc. Jap. 1981. № 2. P. 93—110.
 29. Kaufman K., Burdick L. I. The reproducing earthquakes of the Galapagos Islands//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1980. V. 70. № 5. P. 1759—1770.
 30. Minakami T. Fundamental research for predicting volcanic eruptions (I)//Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. 1960. V. 38. P. 497—544.
 31. Minakami T., Ishikawa T., Yagi K. The eruption of volcano Usu in Hokkaido, Japan//Bull. Volcanol. 1951. T. 11. P. 45—157.
 32. Weaver C. G. Post-May 18 seismicity at Mount St. Helens: volcanic and tectonic implications//US Geol. Surv. Prof. Paper 1250. 1981. P. 109—121.

УДК 550.34.06

ЗОБИН В. М.

**МЕХАНИЗМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
КАМЧАТСКО-КОМАНДОРСКОГО РЕГИОНА В 1964—1982 ГГ.**

EARTHQUAKE FOCI MECHANISM AND SEISMOTECTONIC DEFORMATION IN THE KAMCHATKA—COMMANDER ISLANDS REGION IN 1964—1982, by Z o b i n V. M. The system of stresses in the lithosphere (0—59 km) and upper layers of the asthenosphere (60—150 km) was analyzed on the basis of focal mechanism data for earthquakes exceeding K 12.5 (M 5.3) in 1964—1982. The zoning was made considering the types of movement in earthquake foci and in the predominant stress system. Four homogeneously-stressed areas have been identified within the lithospheric layer and two areas within the asthenospheric layer. Schemes of tensor components of seismotectonic deformation velocity of the region were drawn separately for the lithospheric and asthenospheric layers. To this end data on individual and averaged focal mechanism solutions and regional correlative seismic moment-energy class relationships were used. The Kamchatka area of the Kuril-Kamchatka zone can be considered as a double focal zone by analyzing the character of deep distribution of types of movement and stresses.

(Received July 11, 1986)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Введение

Камчатско-Командорский регион представляет собой уникальную в геотектоническом смысле сейсмоактивную зону Советского Союза. Здесь происходит пересечение двух мощных глобальных структур — Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг и отмечается чрезвычайно высокий уровень сейсмической активности. Сейсмические очаги в основном сконцентрированы в пределах сейсмофокальной зоны, погружающейся под Камчатку под углом 45° до глубин 300—500 км. Высокий уровень сейсмичности отмечается на склонах глубоководных желобов — Курило-Камчатского и Алеутского. Детальное изучение динамики очагов региона может дать ключ к решению многих геотектонических задач.

Исследования очагов землетрясений региона начались в период 1950—1960 гг. работами Л. М. Балакиной, В. Н. Аверьяновой В. Стаудера и др. [1, 5, 22; и др.]. Подробный обзор результатов этих лет приведен в монографии [1]. Главное внимание уделялось положению в пространстве осей напряжений в очагах землетрясений и их соотношениям с простиранием тектонических структур. Основным результатом, общим для всего тихоокеанского пояса, явилось установление в очагах сильных землетрясений ориентации напряжений сжатия почти горизонтально и вкрест простирания структур. Первые попытки регионализации однородно-напряженных участков Курило-Камчатской островной дуги были предприняты В. Н. Аверьяновой [1].

В 1962—1964 гг. существенно увеличилась мировая сеть сейсмических станций; это позволило определять механизм очага относительно

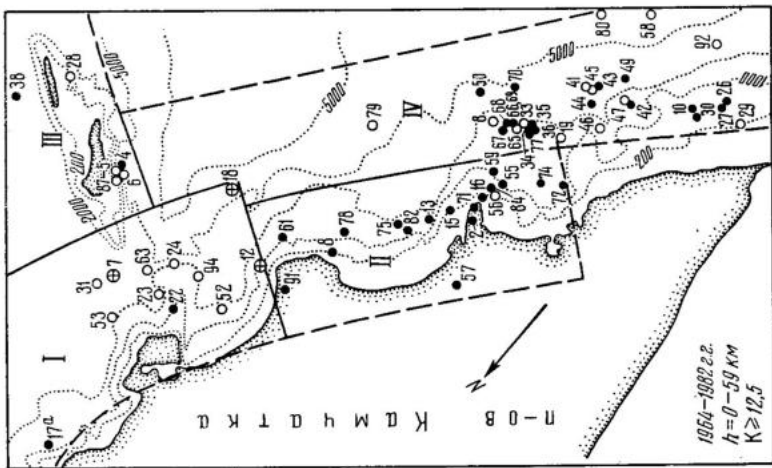
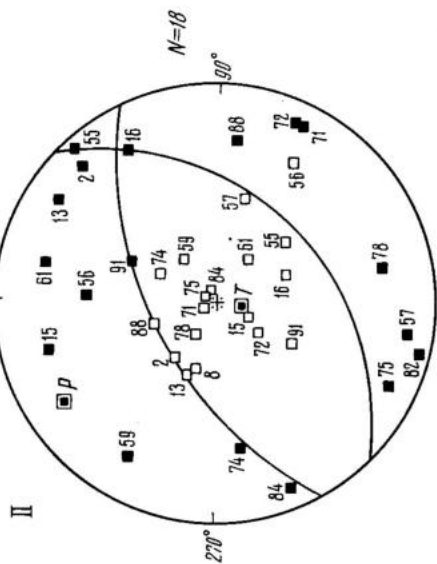
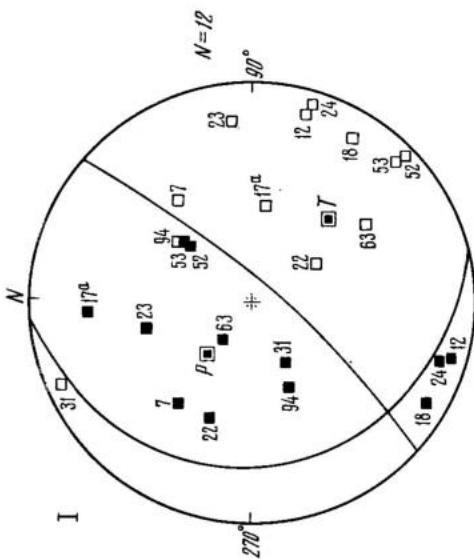
слабых землетрясений. Это обстоятельство, а также появление к концу 60-х годов гипотезы тектоники плит [21] привели к новым результатам в изучении механизма очагов землетрясений. Повысился интерес к анализу типов подвижек в очагах землетрясений. Ряд зарубежных сейсмологов [18, 23] в соответствии с положениями тектоники плит, требующей наличия зоны субдукции на границе океан — континент вследствие погружения под континент океанической литосферной плиты, отмечают преобладание подвижек типа надвига в зоне субдукции и подвижек типа нормальных сбросов в зоне излома океанической литосферной плиты (в зоне глубоководных желобов и их склонов). При этом из двух возможных поверхностей разрыва они выбирают ту, которая согласуется с моделью тектоники плит. Эти положения активно оспариваются в работах Л. М. Балакиной [3, 4], В. Н. Аверьяновой [2], В. Н. Шарапова и др. [16]. Л. М. Балакина считает, что реальным поверхностям разрыва соответствуют не пологозалегающие нодальные поверхности, а близвертикальные нодальные поверхности ввиду большей согласованности их простираения с простираем основных структур основных дуг. В. Н. Аверьянова полагает, что глубинные сейсмогенные процессы не могут быть связаны с чисто механическими надвигами или поддвигами океанической и континентальной плит. Источниками напряженных состояний здесь могут быть физико-химические процессы, связанные с уплотнением и разуплотнением вещества в локализованных объемах, которые представляют собой объемы сжатия и расширения. В. Н. Шаратов с соавторами считают, что альтернативой субдукции может быть широкое сложное сдвигание в зоне сочленения океан — континент.

Представления о сейсмическом течении горных масс и возможность расчета тензора сейсмотектонических деформаций (СТД) [12, 13, 17] позволяют по-новому взглянуть на эту проблему, изучая непосредственно направленность и интенсивность процесса деформирования сейсмофокальной зоны. Проведены оценки скорости СТД для Курило-Камчатского региона [12], построены первые варианты карт компонент тензора СТД [9].

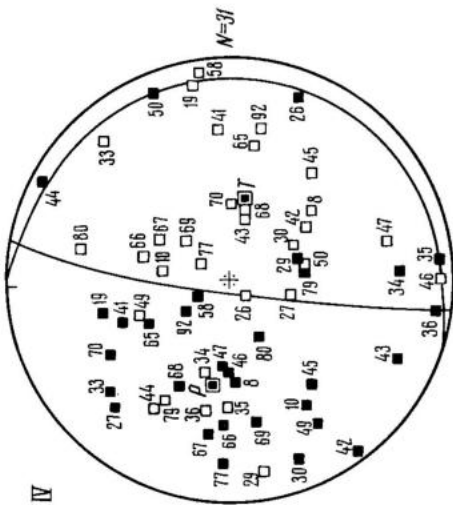
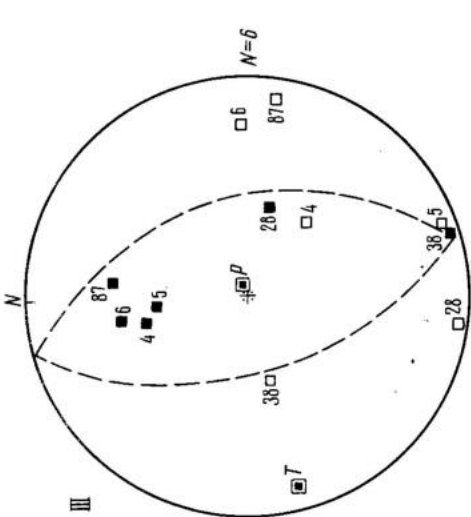
Большая часть полученных данных по изучению механизма очага землетрясений не может быть использована для детальных построений локальных неоднородностей региональной системы напряжений и привязки к определенным тектоническим структурам ввиду относительно низкой точности определения гипоцентров отдельных землетрясений, составлявшей до середины 60-х годов в основном $\pm 25\text{—}50$ км.

Результаты детальных сейсмологических исследований в Камчатско-Командорском регионе, проводимых с конца 1961 г., позволяют по-новому подойти к рассматриваемой проблеме. Был получен каталог землетрясений региона за 1962—1982 гг. с однородной энергетической классификацией землетрясений и высокой точностью (не хуже $\pm 5\div 10$ км) определения гипоцентров землетрясений. Это дает возможность провести достаточно точную привязку в пространстве полученных определений механизма очагов землетрясений, гораздо более детальную, чем было возможно прежде, регионализацию по типам подвижек и действующим системам напряжений в очагах землетрясений.

В статье будут рассмотрены по материалам детальных сейсмологических исследований 1964—1982 гг. характеристики системы напряжений и типов подвижек в очагах землетрясений, а также проведен расчет компонент тензора скорости СТД для Камчатско-Командорского региона за указанный период.



- 1 ○ 2 ⊕ 3
- ▨ 4
- ⋯ 5
- 6 ■ 7 ■ 8



Механизм очагов землетрясений Камчатско-Командорского региона

Исходные материалы. Использованный в работе каталог включает данные о механизме очагов 95 землетрясений региона за 1964—1982 гг. для энергетического класса $K_{S1,2}^{Ф88} > 12,5$ $M > 5,3$ и глубин очага 0—200 км. Эпицентры рассмотренных землетрясений показаны на рис. 1, 2 раздельно для глубин 0—59 и 60—200 км. Каталог составлен на основании опубликованных определений механизмов очага, проведенных в Институте вулканологии ДВО АН СССР [6—8, 11, 14, 24]. Представленные в каталоге данные характеризуют 62% отмеченных за 1964—1982 гг. на глубине 0—150 км землетрясений указанного энергетического уровня. Глубинный интервал 150—200 км не характеризуется из-за малого количества данных. Представительность материала по энергетическим классам и интервалам глубин показана в табл. 1. Границы участка, для которого оценивалась представительность, показаны на рис. 1, 2.

Методика исследования. Реконструкция механизма очага землетрясений проводилась по стандартной методике путем построения на сетке Вульфа (проекция верхней полусферы) нодальных линий распределения знаков смещений в первых вступлениях короткопериодных записей P -волн. Построение дает возможность получить положение в пространстве осей напряжений сжатия, растяжения и промежуточного, действовавших в очаге землетрясения, а также определить тип подвижки в очаге землетрясения. Была принята следующая классификация подвижек: сдвиговая (при равном наклоне к горизонту осей напряжений сжатия и растяжения), взбросовая, либо взбрососдвиговая (при относительно горизонтальном положении оси сжатия) и сбросовая, либо сбрососдвиговая (при относительно горизонтальном положении оси растяжения).

Пространственное распределение типов подвижек показано на рис. 1, 2. Как можно видеть, выделяются участки, в пределах которых подвижки в очагах землетрясений имеют преобладающий тип. На глубинах 0—59 км (см. рис. 1) подвижки типа взбросов и взбрососдвигов распространены преимущественно южнее Камчатского залива и юго-западнее изобаты 3000 м. Это так называемая область выхода Курило-Камчатской фокальной зоны на дно океана. Северо-восточнее изобаты 3000 м в пределах склона и оси Курило-Камчатского глубоководного желоба подвижки типа взбрососдвига и сбрососдвига встречаются приблизительно поровну. В пределах области пересечения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (акватория Командорских островов, Камчатские залив и пролив) преобладают подвижки типа сбросов и сбрососдвигов.

На глубинах 60—200 км область распространения сбрососдвиговых подвижек (рис. 2, область II) протягивается полосой южнее Камчатского залива. Севернее, южнее и восточнее области II отмечаются очаги землетрясений с подвижками типа взбрососдвига (область I на рис. 2).

Чисто сдвиговые очаги составляют относительно небольшое количество и распределены в пространстве достаточно случайно.

Рис. 1. Системы напряжений в очагах землетрясений с глубиной очага 0—59 км. 1—3 — типы подвижек в очагах землетрясений: 1 — взбрососдвиговые, 2 — сбрососдвиговые, 3 — сдвиговые; 4 — границы однородно-напряженных участков; 5 — изобаты, м; 6, 7 — оси напряжений в очагах землетрясений: 6 — растяжения, 7 — сжатия; 8 — средние оси напряжений (P — сжатия, T — растяжения); I—IV — однородно-напряженные участки, N — число наблюдений в пределах участка. Номера соответствуют нумерации рабочего каталога механизмов очагов землетрясений, построенного во временной последовательности возникновения землетрясений

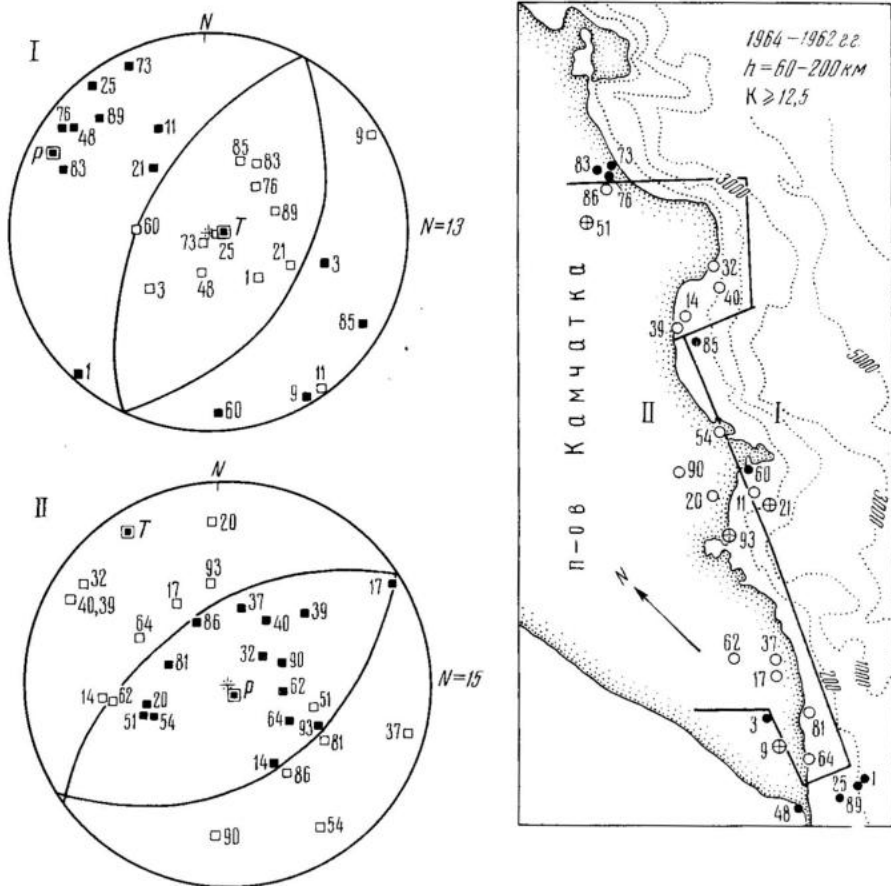


Рис. 2. Системы напряжений в очагах землетрясений с глубиной очага 60—150 км. Условные обозначения см. на рис. 1

Система напряжений в очагах землетрясений в целом неоднородна. На рис. 1, 2 проведена попытка выделить однородно-напряженные участки региона. При этом однородно-напряженным считался участок, в очагах которого оси напряжений варьируют в пределах квадранта при наличии преобладающего типа подвижки. Так было выделено четыре однородно-напряженных участка для глубин 0—59 км и два участка для глубин 60—200 км. Характеристика осредненных систем напряжений, действующих в пределах однородно-напряженных участков, представлена в табл. 2. При построении осредненных систем напряжений для простоты предполагалось, что осредненное решение может быть представлено с помощью нодальных линий, соответствующих плоскому напряженному состоянию.

Распределение напряженного состояния по глубине. На рис. 3 показан вертикальный разрез вкрест простирания структур Курило-Камчатской островной дуги до глубин 150 км в районе п-ва Шипунский. На разрез сведены очаги с известным механизмом очага с эпицентрами в полосе шириной 250 км в ту и другую стороны от линии разреза. Северной границей этой полосы практически служит северная граница участков II и IV (см. рис. 1), т. е. рисунок 3 представляет собой разрез сейсмоактивного объема, связанного с активностью структур Курило-Камчатской островной дуги. Рассмотрим эту схему с востока на запад.

На востоке, под Курило-Камчатским желобом, отмечены два очага землетрясений. Оба эти очага характеризуются преобладанием дейст-

Таблица 1

Представительность каталога механизмов очага землетрясений

Интервал глубины, км	Энергетический класс	Число землетрясений		Землетрясения, отмеченные за 1964—1982 гг., %
		зарегистрировано	обработано	
0—59	12,6—16,0	116	66	57
	12,6—13,5	89	47	53
	13,6—14,5	23	15	65
	14,6—16,0	4	4	100
60—150	12,6—16,0	31	25	81
	12,6—13,5	23	19	83
	13,6—14,5	6	4	66
	14,6—16,0	2	2	100
0—150	12,6—16,0	147	91	62
	12,6—13,5	112	66	59
	13,6—14,5	29	19	66
	14,6—16,0	6	6	100

Таблица 2

Осредненные системы напряжений Камчатско-Командорского региона

Участок, №	Число землетрясений	Оси напряжений, град			
		сжатия		растяжения	
		азимут	угол с горизонтом	азимут	угол с горизонтом
Глубина очага 0—59 км					
I	12	310	56	131	35
II	18	325	18	185	75
III	6	80	85	255	5
IV	31	280	40	100	48
Глубина очага 60—200 км					
I	13	298	6	110	82
II	15	142	84	328	10

вия горизонтального растяжения. Далее на запад в пределах литосферы отмечается зона II, где оси напряжений сжатия и растяжения имеют равный наклон к горизонту и ориентированы вкrest простираения Курило-Камчатских структур; это приводит к формированию сдвиговых подвижек, в равной степени осложненных как взбросовой, так и сбросовой компонентой. Зона II резко смыкается с зоной I, где при доминировании близгоризонтального северо-западного сжатия, действующего вкrest простираения фокальной зоны, возникают подвижки типа взбросов и взбрососдвигов на глубинах 0—80 км. Зона I по своей нижней границе контактирует с зоной III, являющейся своеобразным развитием зоны II и уходящей до глубин 150 км. В пределах зоны III преобладают близгоризонтальные напряжения растяжения северо-западного направления (вкrest простираения фокальной зоны), создающие условия для формирования сбросовых и сбрососдвиговых подвижек в очагах землетрясений. Таким образом, наблюдается сложнопостроенная система напряжений в пределах камчатского участка Курило-Камчатской фокальной зоны. Налицо две ведущие тенденции: восходящие взбрососдвиговые движения верхнего слоя фокальной зоны и нисходящие движения от оси Курило-Камчатского желоба через участок сдвиговых подвижек (зона II) к зоне III сбрососдвигов.

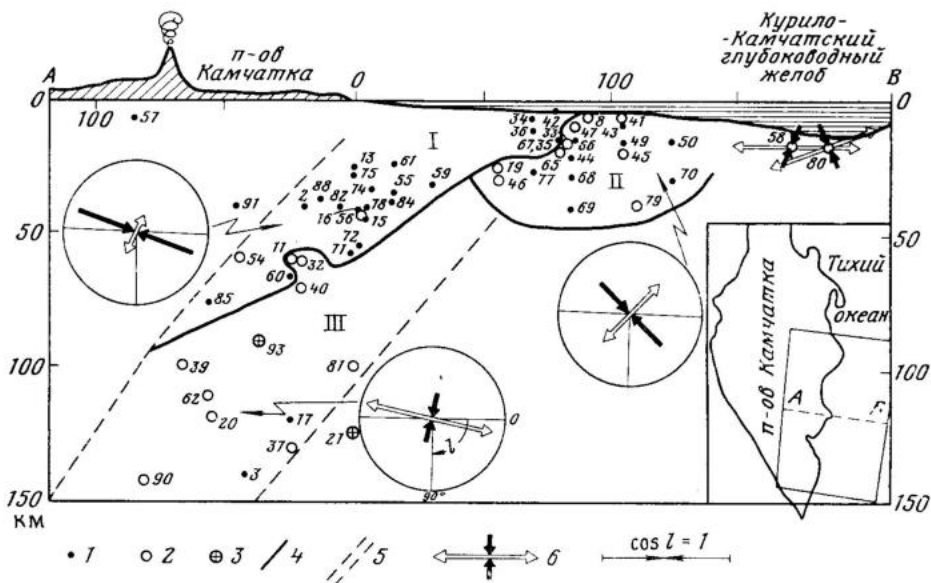


Рис. 3. Вертикальный разрез вкрест простирания Курило-Камчатской островной дуги и распределение типов подвижек в очагах землетрясений по глубине. 1—3— типы подвижек: 1— взрывовые, 2— сбросовые, 3— сдвиговые; 4— граница однородно-напряженных участков; 5— очертания фокальной зоны; 6— система главных напряжений. Номера соответствуют нумерации рабочего каталога механизмов очагов землетрясений

Сеймотектоническое деформирование Камчатско-Командорского региона в 1964—1982 гг.

Схемы скорости СТД строятся на основе определений механизма очага и сейсмического момента землетрясений. Они дают возможность сопоставить интенсивность деформирования различных участков сейсмоактивной зоны.

Методика исследования. Расчет компонент тензора скорости СТД проводился по методике Ю. В. Ризниченко—С. Л. Юнги [12, 13, 17] в рамках представлений о сейсмическом течении горных масс. Рассматривается та часть тектонических деформаций литосферы и астеносферы, которая связана с остаточными смещениями в очагах землетрясений. При этом отдельные очаги представляются микроструктурными деталями в общем процессе разрывно-непрерывного деформирования, и вклад каждого очага в этом процессе считается пропорциональным его сейсмическому моменту M_0 .

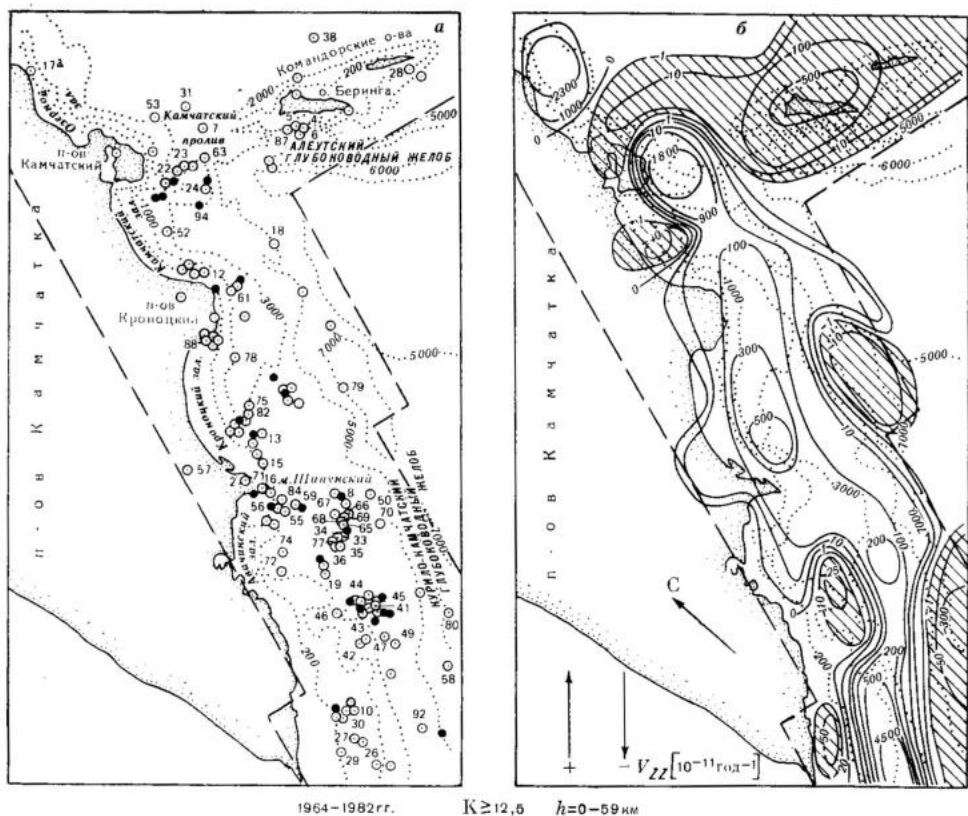
Расчет скорости СТД V_{ik} проводился по формуле [12]:

$$V_{ik} = \frac{1}{2\mu VT} \sum_{j=1}^N M_{0j} (\theta_{ik})_j,$$

здесь μ — модуль сдвига [10], V — единичный объем, равный произведению площади площадки осреднения на интервал глубин; T — период времени, θ_{ik} — единичный направляющий тензор сейсмического момента. Его компоненты θ_{xx} , θ_{yy} , θ_{zz} , θ_{xy} , θ_{xz} и θ_{yz} рассчитываются через параметры механизма очага по формулам, приведенным в [13]. Ось X ориентирована на восток, ось Y на север, ось Z вверх. Для удобства анализа была проведена процедура поворота осей системы координат. При сохранении положения вертикальной оси горизонтальные были повернуты на угол $\varphi=45^\circ$ в соответствии с формулами перехода:

$$V_{X'X'} = V_{XX} \cos^2 \varphi + 2V_{XY} \cos \varphi \sin \varphi + V_{YY} \sin^2 \varphi,$$

$$V_{Y'Y'} = V_{XX} \sin^2 \varphi - 2V_{XY} \sin \varphi \cos \varphi + V_{YY} \cos^2 \varphi.$$



1964-1982 гг. $K \geq 12,5$ $h = 0-59$ км

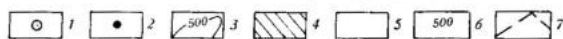


Рис. 4. Эпицентры очагов землетрясений с глубиной очага 0—59 км (а) и схема вертикальной компоненты тензора скорости СТД (б). 1, 2 — эпицентры землетрясений: 1 — с $K > 12,5$, 2 — с $K = 12,5$; 3 — изолинии скорости СТД; 4, 5 — области деформаций: 4 — отрицательных, 5 — положительных; 6 — изобата, м; 7 — границы участка, для которого производились расчеты. Нумерация соответствует нумерации рабочего каталога механизмов очагов землетрясений

Этот поворот осей позволяет проводить анализ в системе координат, где одна из горизонтальных осей направлена вкост простиранья фокальной зоны, а вторая — по простиранью.

Расчет скорости СТД проводился отдельно для двух сейсмоактивных слоев: литосферного (0—59 км) и астеносферного (60—150 км). При расчетах полагалось, что деформация каждого слоя происходит независимо, причем нижняя граница слоя закреплена. Параметры, принятые при расчетах СТД, приведены в табл. 3. Там же указана представительность материала по количеству определений механизма очага и

Таблица 3

Параметры, принятые при расчете СТД

Инервал глубин, км	μ дин-см	V , см ³	T , лет	Представительность по уровню $K > 12,5$					Дополнительные данные	
				по механизму очага			по сейсмическому моменту		диапазон	число землетрясений
				зарегистрировано	обработано	%	обработано	%		
0—59	$5 \cdot 10^{11}$	$5,3 \cdot 10^{20}$	19	116	66	57	33	29	12,5	24
60—150	$7,7 \cdot 10^{11}$	$3,6 \cdot 10^{20}$	19	31	25	81	11	35	11,5—12,5	61

сейсмического момента землетрясений с $K > 12,5$. При неизвестном механизме брался средний механизм по участкам согласно табл. 2, при неизвестном сейсмическом моменте проводилось определение по корреляционным формулам, полученным для Камчатско-Командорского региона в [10]. Кроме землетрясений с $K > 12,5$ привлекались дополнительные материалы по землетрясениям более низкого энергетического уровня (см. табл. 3). Эпицентры всех рассмотренных землетрясений приведены на рис. 4 и 6. Схемы сейсмотектонического деформирования строились методом суммирования землетрясений с постоянной площадью осреднения. В качестве площадки осреднения был принят эллипс, соответствующий площади очаговой зоны землетрясения с магнитудой $M = 7,5-8$ и имеющий оси 150 и 75 км для глубин 0—59 км, и 100 и 50 км для глубин 60—150 км. Суммарная деформация приписывалась узлу сетки размером 25×25 км², которой был покрыт весь рассматриваемый регион. Сетка ориентирована по простиранию Курило-Камчатской островной дуги. Применялся метод скользящего осреднения по площади с перекрытием на 25 км. Большая ось эллипса при этом располагалась по простиранию Курило-Камчатской островной дуги для района Камчатки и по простиранию Алеутской островной дуги для района Камчатского залива и Командорских островов.

В пределах отдельных площадок осреднения отмечалось от 1 до 26 очагов. Для глубины 0—59 км в 13% случаев отмечалось по одному очагу, в 77% случаев — более трех очагов. Для глубин 60—150 км в 32% случаев отмечалось по одному очагу, в 42% — более трех очагов. При построении схем СТД участки, на которых число землетрясений в пределах площадок осреднения было достаточно мало, учитывались наравне с более представительными. Исключение этих участков, по-видимому, нецелесообразно, так как привело бы к искажению общей картины деформирования региона.

Для анализа устойчивости полученных оценок СТД дополнительно были проведены построения изолиний СТД с помощью палеток в форме квадрата размером 50×50 км². Положение и величина максимумов поля СТД почти не изменились.

Сейсмотектоническое деформирование литосферы (глубины 0—59 км). На рис. 4, 5 представлены схемы компонент тензора скорости СТД (деформация удлинения). Схема вертикальной компоненты СТД (см. рис. 4) практически в изолиниях отражает схему соотношения взбросовых и сбросовых подвижек (см. рис. 1). Схемы горизонтальных компонент деформирования вкрест и вдоль Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны (см. рис. 5) имеют больший самостоятельный интерес. Можно видеть, что при деформировании вкрест сейсмофокальной зоны почти весь сейсмоактивный объем литосферы можно рассматривать как подвергаемый деформации укорочения (сжатия) в юго-восточном направлении. При этом максимальное укорочение наблюдается в средней части зоны вдоль узкой полосы проекции выхода сейсмофокальной зоны на дно океана. При деформировании по простиранию сейсмофокальной зоны поле СТД значительно более неоднородно и менее интенсивно. Отмечаются чередующиеся участки превалярующих деформаций удлинения и укорочения.

Максимальные величины деформаций литосферы наблюдаются, как и следовало ожидать, в районах, где произошли наиболее сильные землетрясения (с магнитудой около семи и выше). Величины скорости СТД здесь на порядок выше, чем для других участков литосферы региона. Деформирование литосферы по вертикали и вкрест простирания Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны происходит с близкими скоростями.

В области очагов сильных событий скорость СТД составляет величину около 10^{-8} год⁻¹, на других участках — около 10^{-9} год⁻¹. Оценки

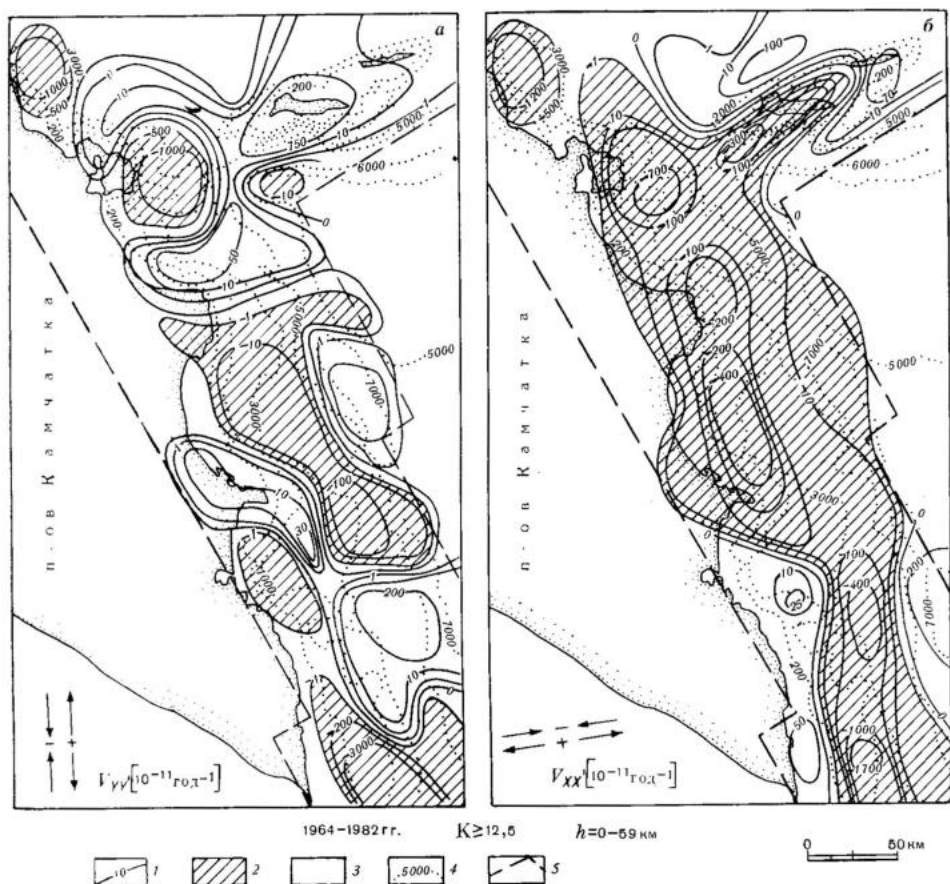


Рис. 5. Схемы горизонтальных компонент тензора скорости СТД на глубинах 0—59 км по пространству (а) и вкrest простирания (б) структур Курило-Камчатской островной дуги. 1 — изолинии скорости СТД; области деформаций: 2 — отрицательных, 3 — положительных; 4 — изобата, м; 5 — границы участка, для которого производились расчеты

скорости СТД за 30-летний период (1933—1966 гг.) Курило-Камчатского региона в целом [12] дают величину $5 \cdot 10^{-8}$ год $^{-1}$. По-видимому, скорость СТД в области очагов рассмотренных сильных землетрясений соответствует средней скорости деформирования всего региона.

Для оценки доли вклада СТД в общий процесс деформирования литосферы сильными землетрясениями с $M=7,5-7,8$ сравним величины вертикальных смещений в области очагов сильных землетрясений 1971—1984 гг. в районе Камчатского полуострова по геодезическим и сейсмологическим данным. Оценка смещения поверхности литосферного слоя мощностью 59 км при вертикальной скорости деформирования 10^{-8} год $^{-1}$ дает величину 0,6 мм за год. Ввиду того что за рассматриваемые 19 лет вклад сильного землетрясения в суммарную деформацию был определяющим, можно полагать, что величина смещения в результате СТД при, например, землетрясении 15.XII.1971 г. ($M=7,8$) в районе Камчатского полуострова была равна 11,4 мм. Оценки вертикальных смещений, полученные геодезистами¹ на профиле вдоль побережья Камчатского полуострова, показали, что после землетрясения 15.XII.1971 г. остаточные смещения на базе 35 км превысили 11 см. После землетрясения 28.XII.1984 г. ($M=7,5$) относительные смещения достигли 7 см

¹ См. статью С. А. Федотова, М. А. Магуськина, В. Е. Левина и др. в следующем выпуске журнала.

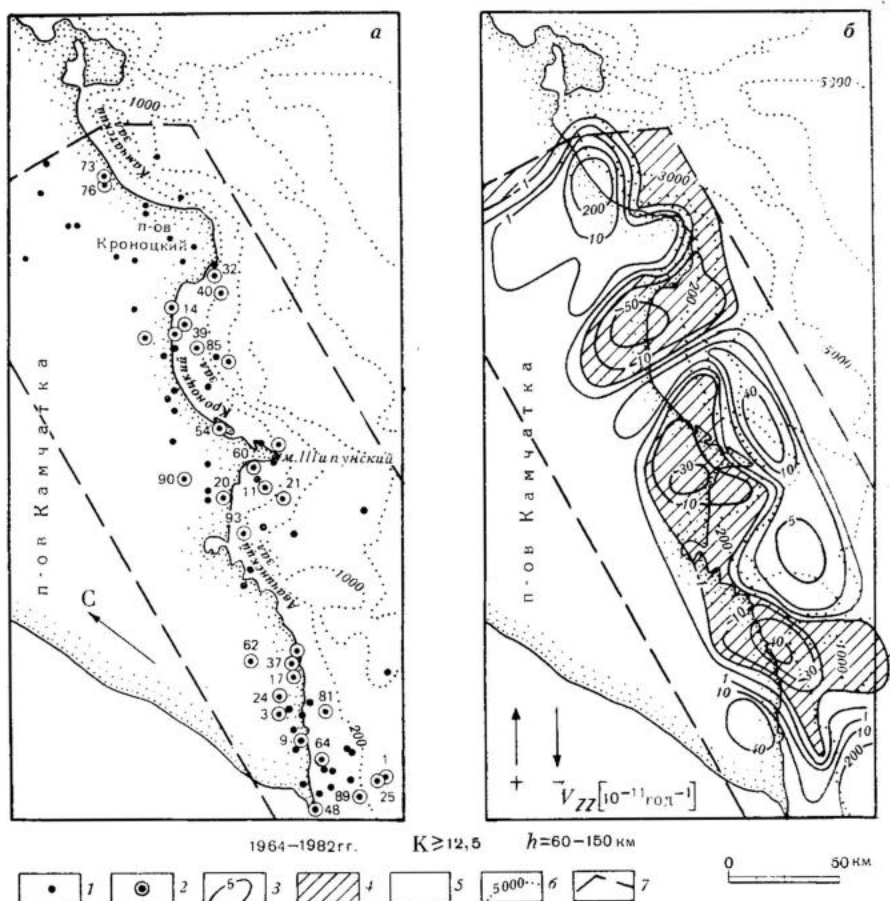


Рис. 6. Эпицентры очагов землетрясений с глубиной очага 60—150 км (а) и схема вертикальной компоненты тензора скорости СТД (б). 1, 2 — эпицентры землетрясений: 1 — с $K > 12,5$, 2 — с $K = 12,5$; остальные условные обозначения см. на рис. 4

на базе 15 км. Сопоставление геодезических измерений и сейсмологических оценок показывает, что в данном случае вклад СТД в общую деформацию литосферы при сильных землетрясениях составлял величину порядка 10% общей деформации².

Сейсмотектоническое деформирование верхних слоев астеносферы (глубины 60—150 км). Деформации в этом интервале глубин происходят в основном в результате движений в пределах погружающегося под Камчатку сейсмофокального слоя. Схемы на рис. 6 и 7 показывают процессы деформирования в сейсмофокальном слое в проекции на плоскость.

Средняя скорость деформирования верхних слоев астеносферы как по вертикали, так и в горизонтальной плоскости, на порядок ниже, чем в литосфере. Отмечается существенно большая неоднородность поля СТД. При этом скорости деформирования по вертикали и горизонтали имеют один и тот же порядок величины, что и в литосфере.

² Еще большие расхождения получаются в районе геодезического полигона, расположенного на побережье Авачинского залива вокруг г. Петропавловска-Камчатского. По оценкам СТД деформации здесь менее 10^{-11} год $^{-1}$. Однако по данным частых систематических светодальномерных измерений, длины линий, достигающих 40 км, часто изменяются более чем на 10^{-6} год $^{-1}$. Причина столь больших расхождений еще не выяснена. (Примеч. главн. ред.).

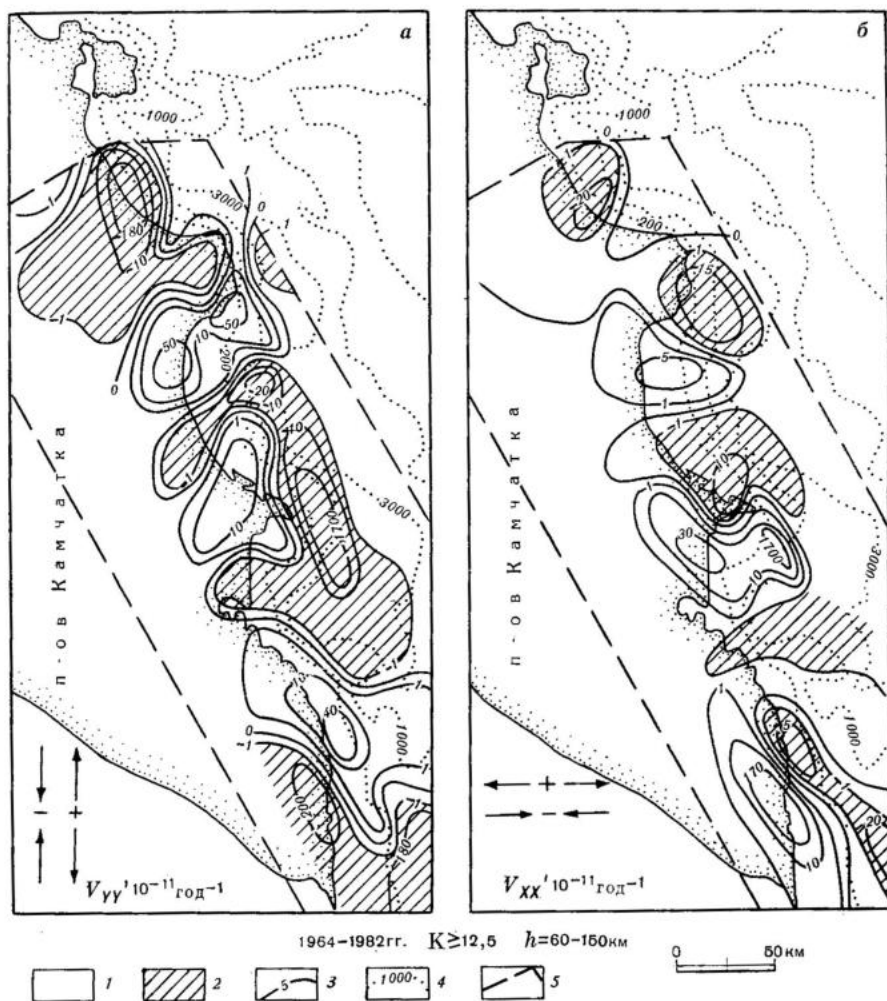


Рис. 7. Схемы горизонтальных компонент тензора скорости STD на глубинах 60–150 км по простиранию (а) и вокруг простирания (б) структур Курило-Камчатской островной дуги. Области деформаций: 1 — положительных, 2 — отрицательных; 3 — изолиния скорости STD; 4 — изобата, м; 5 — границы участка, для которого производились расчеты

Обсуждение результатов

Получены следующие основные результаты: проведено районирование Камчатско-Командорского региона по типам напряженного состояния вещества литосферы и астеносферы до глубин 150 км, построены схемы в изолиниях компонент тензора сейсмотектонических деформаций для региона. Рассмотрим, как соотносятся полученные результаты с данными более ранних исследований и с существующими геотектоническими гипотезами.

Районирование региона по типам напряженного состояния, проведенное в данной работе, отличается от более ранних построений двумя основными моментами: повышенной точностью определения гипоцентров в период детальных сейсмических наблюдений 1962–1982 гг. (это позволило с большей надежностью построить распределение в пространстве типов подвижек в очагах землетрясений), и более низким энергетическим уровнем рассматриваемых событий.

Схемы районирования были ранее опубликованы в работах [1, 16, 24]. Схемы В. Н. Аверьяновой [1] и И. Г. Симбиревой [16] составлены на основе почти одного и того же материала — каталога механизмов очага В. Н. Аверьяновой. По [1] рассматриваемая зона чрезвычайно дифференцирована по характеру движений и поля напряжений. Область взбросовдвигов протягивается широкой полосой вдоль всей сейсмоактивной зоны, захватывая восточное побережье Камчатки. В северной части Курило-Камчатской зоны к горизонтальным близки субмеридиональные напряжения сжатия. Сбросовдвиговые дислокации приурочены к двум также линейно вытянутым вдоль островной дуги областям. Одна из них протягивается вдоль побережья Камчатки и характеризуется неглубоким залеганием. Вторая, более обширная, приурочена к оси глубоководного желоба, при этом субмеридиональные напряжения растяжения близки к горизонтальным.

По И. Г. Симбиревой [16] характерной особенностью флуктуаций регионального поля является чередование зон сжатия и растяжения вдоль восточного побережья Камчатки. До глубин 60 км устанавливаются участки преобладающего сжатия под восточными полуостровами Камчатки, ложем Берингова моря, а также на крайнем юге Камчатки. Области растяжения выявлены для восточных заливов Камчатки.

В статье В. М. Зобина [24] на основе материалов 1964—1970 гг. была предложена следующая схема региональной системы напряжений на глубинах 0—50 км: генеральная полоса взбросовдвигов Курило-Камчатской фокальной зоны, проходящая вдоль восточного побережья Камчатки, пересекается рядом поперечных сбросовдвиговых структур: Алеутской, юга Камчатского залива, Шипунской с подводным продолжением Шипунского полуострова — хребтом Шатского. Этот вариант региональной системы напряжений практически и получил дальнейшее развитие на более обширном материале (см. рис. 1).

Схема рис. 1 находится в определенном согласии с результатами В. Н. Аверьяновой: наблюдаются те же линейные области взбросовдвигов фокальной зоны и сбросовдвигов Курило-Камчатского желоба. Не исключено, что отмеченная у В. Н. Аверьяновой полоса сбросовдвигов вдоль Восточной Камчатки в определенной степени мнимая и возникла в связи с недостаточной точностью определений гипоцентров до 1964 г. Скорее всего она должна смыкаться с полосой сбросовдвигов желоба, и тогда эта двойная полоса будет соответствовать зоне IV на рис. 1. Отмеченная у И. Г. Симбиревой [16] приуроченность зон сбросовдвигов к заливам Восточной Камчатки не нашла подтверждения в нашей схеме.

Первыми схемами СТД региона были построения, проведенные автором по материалам 1979—1981 гг. по энергетическому уровню $K \geq 11,5$ для литосферного слоя 0—50 км [9]. Построенные на рис. 4—7 схемы скорости СТД для 19-летнего интервала дополнили и уточнили полученные в [9] результаты, позволили оценить вклад сильных землетрясений в общий ход сейсмостектонического деформирования региона. Как следует из рис. 4, 7, скорости СТД в областях очагов сильных землетрясений на порядок превышают величины скоростей в прилегающих сейсмоактивных зонах.

Вне областей очагов сильных землетрясений в период 1964—1982 гг. основное деформирование сейсмоактивной зоны происходило в районе глубоководного Алеутского желоба, Кроноцкого залива и подводного хребта Шатского. При этом, как видно на рис. 4, 5, структура фокальной зоны плавно переходила в структуры хребта Шатского, оставляя западнее него зону пониженной сейсмичности. Деформация блока Кроноцкий залив — подводный хребет Шатского проходила примерно с равномерной скоростью как по вертикали, так и вкрест простиранья структур Курило-Камчатской островной дуги.

Глубинный разрез, изображенный на рис. 3, демонстрирует закономерный переход системы напряжений, действующей в литосфере камчатского участка Курило-Камчатской островной дуги, к системе напряжений, действующей в верхах астеносферы. Отметим, что близкая картина наблюдается в построениях для двойной фокальной зоны в районах Хоккайдо и Южных Курил [19, 20]. Фокальная зона там подразделяется на две тонкие плоскости. Эти плоскости взаимно параллельны, расстояние между ними 30—40 км. Верхняя плоскость исчезает на глубинах 120 км, в то время как нижняя начинается на глубинах 70 км и распространяется вглубь. По композитным механизмам очагов микроземлетрясений верхняя плоскость характеризуется взбросовыми подвижками и сжатием по падению, а нижняя — сбросами и растяжением по падению. Следует отметить при этом, что К. Фуджита и Х. Канамори [19] считают, что утверждение [20] об ориентации напряжений сжатия и растяжения по падению фокальных зон недостаточно обосновано фактическим материалом, и более реально говорить просто о преобладании сжатия в верхней части плоскости и растяжении в нижней. Необходимое условие существования двойных фокальных зон в пределах надвигающейся океанической плиты — примерно равное соотношение напряжений сжатия и растяжения [19].

Как видно на рис. 3, представленная схема распределения по глубине напряжений в пределах Камчатского участка Курило-Камчатской фокальной зоны соответствует характеристике системы напряжений, свойственной двойной фокальной зоне. Следует отметить, что существование двойной фокальной зоны в районе Камчатки было недавно показано в работе [15] на основе анализа распределения гипоцентров. Таким образом, построенная нами система напряжений не противоречит концепции тектоники плит для района Камчатки.

Район Командорских островов и Камчатского залива, служащий западным окончанием структур Алеутской островной дуги, как следует из рис. 1, является областью развития сбросовых и сбрососдвиговых дислокаций. Его деформирование происходит достаточно неоднородно. Можно отметить лишь общую тенденцию нисходящих движений. При этом участок I (см. рис. 1), т. е. зона непосредственного стыка Алеутских и Курило-Камчатских структур, унаследовал черты систем напряжений обоих типов структур: на участке I действует северо-западное сжатие, как в зоне II, и близгоризонтальное растяжение, как на участке III.

Из схем на рис. 1 и 4, следует, что на уровне северной части Кроноцкого полуострова наблюдается резкая смена действующей региональной системы напряжений, что, по-видимому, отражает эффект стыковки структур Алеутской и Курило-Камчатской островных дуг. Не исключено, что это обстоятельство и привело к смещению на запад линии активных вулканов и эпицентров землетрясений, отмеченному в [15].

Относительно небольшой период наблюдений (19 лет), недостаточно однородный каталог определений механизмов очагов и очаговых параметров землетрясений не позволяют считать выводы статьи окончательными. Осуществляемая в настоящее время работа по пополнению и перепределению по единым программам каталога очаговых параметров и механизма очагов землетрясений, а также более детальное сопоставление результатов расчета СТД и геодезических и геоморфологических данных позволят в дальнейшем существенно уточнить сложную картину напряженного состояния региона.

Автор признателен А. А. Гусеву за плодотворное обсуждение отдельных положений работы, а также К. И. Кузнецовой, С. А. Федотову и Л. С. Шумилиной за полезные замечания; Е. И. Ивановой и В. Н. Чирковой, которые провели большую работу по подготовке исходного материала и построению схем СТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аверьянова В. Н.* Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. 192 с.
2. *Аверьянова В. Н.* Глубинная сеймотектоника островных дуг. М.: Наука, 1975. 219 с.
3. *Балакина Л. М.* Ориентация разрывов и подвижек в очагах сильных землетрясений северной и северо-западной частей Тихого океана//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 4. С. 43—52.
4. *Балакина Л. М.* Ориентация напряжений в очагах землетрясений Тихоокеанского пояса и гипотеза тектоники плит//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 5. С. 16—30.
5. *Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И.* Поле упругих напряжений Земли и механизмы очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 190 с.
6. Землетрясения СССР в 1979—1982 гг. М.: Наука, 1982—1985.
7. *Зобин В. М.* Механизм очага трех сильных Камчатских землетрясений 1969—1973 гг. и их афтершоков//Вулканология и сейсмология. 1979. № 5. С. 74—88.
8. *Зобин В. М.* Процесс в очаге Петропавловского землетрясения (24 ноября 1971 г.)//Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 91—103.
9. *Зобин В. М., Иваненко Л. К., Чиркова В. Н.* Сейсмотектоническое деформирование литосферы Камчатско-Командорского региона в 1979—1981 гг.//Вулканология и сейсмология. 1986. № 4. С. 75—88.
10. *Зобин В. М., Иванова Е. И., Чиркова В. Н.* Очаговые параметры землетрясений Камчатско-Командорского региона//Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 83—103.
11. *Зобин В. М., Фирстов П. П., Иванова Е. И.* Рой землетрясений в районе вулкана Карымского в январе—феврале 1978 г.//Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 64—73.
12. *Никитин Л. В., Юнга С. Л.* Методы теоретического определения тектонических деформаций и напряжений в сейсмоактивных областях//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 11. С. 54—57.
13. *Ризниченко Ю. В.* Расчет скоростей деформаций при сейсмическом течении горных масс//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 10. С. 34—47.
14. Сейсмичность, напряженное состояние и особенности деформирования земной коры и верхней мантии Камчатского региона по сейсмологическим данным 1974—1978 гг.: Отчет о НИР (заключит.). ВНИИЦентр № ГР 76086745, 76086740, 76086744; Инв. № Б 964852. М., 1981. 213 с.
15. *Федотов С. А., Гусев А. А., Чернышева Г. В., Шумилина Л. С.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, распределение гипоцентров, связь с вулканизмом)//Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 81—107.
16. *Шарапов В. Н., Симбирева И. Г., Бондаренко П. Я.* Структура и геодинамика сейсмофокальной зоны Курило-Камчатского региона. Новосибирск: Наука, 1984. 199 с.
17. *Юнга С. Л.* О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 14—23.
18. *Cormier V. F.* Tectonics near the junction of the Aleutian and Kurile-Kamchatka Arcs and a mechanism for middle tertiary magmatism in the Kamchatka basin//Geol. Soc. Amer. Bull. 1975. V. 86. P. 443—453.
19. *Fujita K., Kanamori H.* Double seismic zones and stresses of intermediate depth earthquakes//Geophys. J. R. A. S. 1981. V. 66. P. 131—156.
20. *Hasegawa A., Umino N., Takagi A., Suzuki Z.* Double-planes deep seismic zone and anomalous structure in the upper mantle beneath north-eastern Honshu (Japan)//Tectonophysics. 1979. V. 57. № 1. P. 1—6.
21. *Isacks B. L., Oliver J., Sykes L. R.* Seismology and new global tectonics//J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 5855—5899.
22. *Stauder W.* S-wave studies of earthquakes of the North Pacific, Part 1: Kamchatka//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1962. V. 52. № 3.
23. *Stauder W., Mualchin L.* Fault motion in the larger earthquakes of the Kurile-Kamchatka Arc and the Kurile-Hokkaido corner//J. Geophys. Res. 1976. V. 81. № 2. P. 297—308.
24. *Zobin V. M.* Focal mechanism of shallow and intermediate earthquakes in Kamchatka-Commander region//Bull. Volcanol. 1979. V. 42. № 1/4. P. 43—58.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР

Поступила в редакцию
11.VII.1986

УДК 550.343.6

ФЕДОТОВ С. А., ЧЕРНЫШЕВ С. Д.

20 ЛЕТ ДОЛГОСРОЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА
ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ: ДОСТОВЕРНОСТЬ
В 1981—1985 ГГ., В ЦЕЛОМ ЗА 1965—1985 ГГ.
И ПРОГНОЗ НА 1986—1990 ГГ.

TWENTY YEARS OF LONG — TERM SEISMIC PREDICTION FOR THE KURIL-KAMCHATKA ARC: RELIABILITY IN 1981—1985, 1965—1985 AND PREDICTION FOR 1986—1990, by Fedotov S. A. and Chernyshev S. D. This paper offers an evaluation of long-term seismic prediction for the Kuril-Kamchatka arc made according to S. A. Fedotov's method (1965, 1968) in 1965—1985. The forecast of earthquakes with $M \geq 7^{3/4}$ and seismic activity A_{10} , showing the seismicity level, turned out to be successful. Less confident were evaluations of arc section arrivals into the foreshock stage of earthquakes with $M \geq 7^{3/4}$ and also the probability of earthquakes with $M = 5^{3/4} - 7$. The reasons for such deviations are discussed. Methods of further improvement of seismic prediction are considered. The long — term seismic prediction for the Kuril-Kamchatka arc is given for the period of 1986—1990.

(Received July 29, 1987)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii; 683006; USSR;

Institute of Physics of the Earth, Kamchatka Geophysical Station, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii; 683024, USSR.

В 1963—1964 гг. было начато сравнительное исследование имевшихся к тому времени данных о сейсмичности областей очагов курило-камчатских и японских землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ и начат поиск связанных с ними закономерностей. Сильнейшие землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$ являются главными событиями в сейсмическом процессе. Велось сравнительное изучение сейсмичности в областях очагов землетрясений Курильских островов, Камчатки и Японии с $M \geq 7^{3/4}$ по имевшимся к тому времени данным [10, 11]. Краткий очерк этих исследований приводился ранее [14].

Была установлена закономерность в размещении очагов сильнейших землетрясений, проявляющаяся в том, что землетрясения такой силы имеют тенденцию происходить в тех местах сейсмогенной зоны, где их не было в течение многих десятилетий или столетий [10]. Было введено понятие сейсмического цикла, подразумевающее закономерное изменение сейсмичности в некоторой области между землетрясениями предельной силы, захватывающими эту область, и найдены его свойства [11]. Все это позволило в начале 1965 г. предложить методику долгосрочного сейсмического прогноза и составить такой прогноз для Курило-Камчатской дуги и Северо-Восточной Японии на четыре пятилетия, 1965—1985 гг. [11]. Методика излагалась в предыдущих работах [10, 11]. Прогноз впоследствии 3 раза уточнялся по пятилетиям — на 1971—1975, 1976—1980 и 1981—1985 гг. [12—14]. В 1980 г. правила, по которым строились границы очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, были проверены и формализованы в большей мере, чем первоначальные, благодаря чему стали точнее выделяться места следующих таких землетрясений. Были

также проверены свойства сейсмического цикла, позволяющие прогнозировать величины сейсмической активности A_{10} и оценивать вероятности землетрясений с магнитудами $M=5\frac{3}{4}—7\frac{1}{2}$ [14]. В 1965—1980 гг. долгосрочный сейсмический прогноз успешно оправдывался.

Методика может применяться для долгосрочного сейсмического прогноза сильных землетрясений и уровня сейсмичности не только в Курило-Камчатской и Японской островных дугах, но и в других областях поддвига литосферных плит, а также в больших однородных сейсмических областях с иной тектоникой.

Вероятные места следующих сильных землетрясений, выделяемые предложенным способом [10], получили в мировой литературе название «seismic gaps». Их определение с успехом ведется во многих странах мира, что было показано, например, на специально посвященной этому вопросу конференции, которая проходила при Массачусетском политехническом институте в 1978 г. [24]. Другая часть нашей методики, основанная на свойствах сейсмического цикла, использовалась в мировой сейсмологии в значительно меньшей степени.

В данной статье рассматриваются следующие вопросы: другие методики долгосрочного сейсмического прогноза; оценка достоверности долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на 1981—1985 гг.; оценка эффективности методики в целом за прошедшие 20 лет ее применения (1965—1970, 1971—1975, 1976—1980, 1981—1985 гг.); уточнение долгосрочного сейсмического прогноза на 1986—1990 гг.; сопоставление сделанного прогноза с другими оценками сейсмической обстановки и обсуждение возможных путей совершенствования методики.

Другие способы, применявшиеся для долгосрочного сейсмического прогноза землетрясений Курило-Камчатской дуги

Проблемы выделения опасных участков для районов островных дуг и краев тектонических плит и создания методик долгосрочного прогноза стали рассматриваться с конца 60-х годов многими авторами [2—4, 6, 7, 16—26]. Кратко рассмотрим ряд методик, применявшихся для прогноза курило-камчатских землетрясений.

В работах М. Висса и Р. Е. Хабермена [26] предложен интересный анализ форшоковой сейсмичности, основанный на выделении зон пониженной сейсмической активности. На примере различных регионов показано, что перед сильными землетрясениями могут возникать долгоживущие зоны затишья, причем период затишья зависит от магнитуды ожидаемого землетрясения. Для участков Средних и Северных Курильских островов были выделены две опасные зоны, расположенные между очагами землетрясений 1952 и 1963 гг. и разделенные проливом Крузенштерна (расстояние вдоль дуги $\Delta=1000$ км) (рис. 1). Указывался также период продолжительностью 19 лет, во время которого можно ожидать большое землетрясение: 1979—1997 гг. Указанная методика интересна тем, что использует простые алгоритмы, однако она не позволяет выделять места следующих сильных землетрясений с достаточной точностью. Это связано с тем, что для рассмотрения выбираются прямоугольные области, захватывающие всю дугу по ширине, и не учитывается расположение границ очагов сильнейших землетрясений.

В работах В. И. Кейлиса-Борока и В. Г. Кособокова с соавторами [3, 6] используется методика, являющаяся решением задачи классификации с обучением. Она основана на введении ряда параметров, статистическая обработка которых позволяет выделять районы, где возможны землетрясения с $M \geq 8,2$. После создания основного варианта [3] методика дорабатывалась и улучшалась — магнитудный порог был уменьшен до $M=8,0$, число параметров сокращено от шести до двух. В работе

[6] предложен способ выделения периодов повышенной вероятности возникновения землетрясений с $M \geq 8,0$, с помощью которого существенно сокращен пространственно-временной объем ожидания таких землетрясений. Недостатком этой методики является, на наш взгляд, то, что вся сейсмогенная зона, имеющая большую площадь поперечного сечения (размеры 200×100 км), заменяется проекцией на линию, образованную глубоководными желобами и континентальными склонами. При этом не учитывается возможность того, что в одном участке островной дуги на разных расстояниях от глубоководного желоба может размещаться несколько областей очагов сильнейших землетрясений, и задача является по крайней мере двумерной. Типичным примером такого расположения могут служить очаги землетрясений 06.XI 1958 г. с $M=8,2$ и роя землетрясений 22—24.III 1978 г. с $M_{\max}=8,0$ на Южных Курилах против о-ва Итуруп (см. рис. 1).

В. А. Широковым был предложен хорошо зарекомендовавший себя способ выделения периодов повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений ($M \geq 7,0$), а также вулканических извержений на Камчатке и Северных Курильских островах. Методика основана на выделении активных фаз в периоде изменения склонения Луны, равном 18,613 г. [16, 19]. Для землетрясений с $M \geq 7,0$ указываются интервалы времени длительностью в несколько лет, в которых такие землетрясения ожидаются с вероятностью, в 9—10 раз превышающей среднюю. Указанная методика используется как дополнение к долгосрочному сейсмическому прогнозу, обсуждаемому в настоящей статье.

В работе А. М. Шурыгина и М. Г. Одинец [17] дан интересный статистический анализ сейсмичности Курил и выявлен средний период повторения сгустков землетрясений с $M \geq 6,0$, равный $T=5,5$ лет. Длина периода обусловлена в основном сейсмичностью Южных Курил за последние 30 лет. Алгоритм прогноза построен так, что выделенный период $T=5,5$ лет в существенной степени определяет время прогнозируемых землетрясений с $M \geq 7,3$, что по-видимому, не совсем правомерно, так как для других районов Курило-Камчатской дуги указанный период не характерен. Место ожидаемого землетрясения также сильно зависит от расположения сгустков предшествующих землетрясений с $M \geq 6,0$, что обуславливает постоянную опасность Южных Курил. Как и в ряде других работ, сейсмогенная зона рассматривается в виде проекции на ось островной дуги. Необходимо отметить, что с 1975 по 1986 г. прогноз оправдался в трех случаях из пяти. Ретроспективный прогноз на 1975—1982 гг., по данным за 1936—1974 гг., дал два правильных предсказания землетрясений с $M \geq 7,3$ (1975 и 1978 гг.) и одну «ложную тревогу». Прогноз на 1983—1987 гг. давал два периода повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений для Южных Курил — 1983—1984 гг. и 1986 г. Прогноз на 1984 г. можно считать оправдавшимся (см. следующий раздел статьи). Прогноз на 1986 г. не подтвердился — землетрясений с $M \geq 7,3$ на Южных Курилах не было.

В работе А. Д. Завьялова [4] дается схема использования параметра концентрации сейсмогенных разрывов $K_{ср}$ для прогноза землетрясений с энергетическим классом $K_S^{\Phi}_{1,2} \geq 13,5$ ($M \geq 6,0$) для Камчатки. Исследуется поведение параметра $K_{ср}$ перед 29-ю такими землетрясениями за период 1962—1982 гг. В качестве прогностического признака было выбрано понижение величины параметра $K_{ср}$ за несколько лет до ожидаемого землетрясения. Размеры областей, в которых объявляются периоды ожидания землетрясений, варьируются в зависимости от порогового уровня $K_{ср}$ в пределах от $1,0 \pm 0,06\%$ до $18,8 \pm 2,8\%$ от площади всего рассматриваемого региона. Методика дала положительные результаты при прогнозе мест камчатских землетрясений средней силы ($M \approx 6$), но имеет ряд дискуссионных положений. Уменьшение концентрационного критерия $K_{ср}$, которое считается прогностическим признаком, пропорцио-

нально росту числа очагов землетрясений в рассматриваемом объеме, т. е. сейсмической активности в нем за время, прошедшее с выбранного момента его отсчета. Подобный прогноз сходен с простой оценкой вероятности сильных землетрясений по графику повторяемости. Не учитываются такие явления, как сейсмическое затишье и залечивание разрывов, которое может играть существенную роль при длительной подготовке больших землетрясений.

Другие подходы к проблеме долгосрочного сейсмического прогноза, в том числе основанные на геодезических данных, приведены в ряде книг [18, 22, 24, 25; и др.]. Указанные работы в той или иной степени представляют интерес в качестве дополнения к методике долгосрочного прогноза, применяемой нами для Курило-Камчатского региона.

Перейдем к оценке результатов прогноза, дававшегося на предыдущее пятилетие, 1981—1985 гг.

Оценка достоверности прогноза на 1981—1985 гг.

В 1983 г. был опубликован уточненный долгосрочный прогноз для Тихоокеанской фокальной зоны у берегов Камчатки и Курильских островов на 1981—1985 гг. [13]. Ранее аналогичный прогноз давался, начиная с 1965 г., на предшествующие пятилетия [11, 12, 14]. Во всех случаях прогнозировалась сейсмичность на глубине 0—80 км.

Для всей Курило-Камчатской дуги указывались наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$. На рис. 1 приведена карта Курило-Камчатской дуги и дано расположение очагов сильнейших землетрясений ($M \geq 7^{3/4}$) за последние 150 лет. Участки дуги с различной штриховкой соответствуют различной вероятности ожидания подобных землетрясений в будущем. Для землетрясений с $M < 7^{3/4}$ и величин сейсмической активности A_{10} прогноз давался для полосы максимальной сейсмичности шириной 100 км, северо-западная граница которой отстоит на расстоянии 50 км от оси вулканического пояса. Полоса прогноза разделена в соответствии с расположением очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ и состоит из 15 участков, в каждом из которых уровень сейсмичности обусловлен соответствующей стадией сейсмического цикла и может быть предсказан по графикам изменения сейсмической активности $A_{10}(t)$ и сбрасывания сейсмической энергии $D(t)$ в течение цикла [11, 12]. Два участка — № 3, напротив о-ва Шикотан, и № 12, напротив Авачинского залива, разделены вдоль дуги на две части — юго-восточную (а) и северо-западную (б), так как здесь в части полосы прогноза, прилегающей к побережью, остается достаточно пространства для больших землетрясений. Для всей полосы прогноза в табл. 1 приведены следующие величины: расстояния Δ в км, отсчитываемые вдоль дуги, см. рис. 1; ожидавшиеся стадии сейсмического цикла (I — стадия афтершоков, II — стадия стабильного сейсмического режима, III — стадия форшоков); оценка вероятности того, что участок вступил в стадию форшоков; прогнозировавшиеся с вероятностью 0,7 интервалы значений сейсмической активности A_{10} и их средние величины; нижние пределы магнитуд землетрясений, ожидавшихся с вероятностями 0,8; 0,5 и 0,15, и максимальные возможные магнитуды для наиболее опасных мест. В последних графах указаны величины A_{10} и магнитуды сильнейших землетрясений, наблюдаемых в 1981—1985 гг. в каждом из участков, а также приведена оценка прогноза.

На период 1981—1985 гг. у берегов Камчатки и Курильских островов указывалось шесть мест, в которых наиболее вероятны землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$. Это участки № 126 ($\Delta = 1550—1700$ км) — напротив Авачинского залива, № 36 ($\Delta = 200—300$ км) — о-в Шикотан, № 7 ($\Delta = 750—1000$ км) и о-в Симушир — пролив Крузенштерна, № 14 ($\Delta = 1850—2000$ км) — Камчатский залив, № 9 ($\Delta = 1100—1200$ км) — район о-ва

Таблица 1

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской фокальной зоны на 1981—1985 гг. и его проверка ($r=50-150$ км, $R \leq 80$ км)

№ участка (см. рис. 1)	Район	Δ, км	Стадия цикла и ее оценка по данным 1976—1980 гг.				Прогноз на 1981—1985 гг.				Действительность, 1981—1985 гг.		Оценка прогноза			
			стадия	P (A ₁₀)	P (D)	P (A ₁₀) · P (D)	A ₁₀ (P ~ 0,7)		P ~ 0,15	P (M ≧ 7 ^{3/4})	M _{max}	A ₁₀	M	A ₁₀ P ~ 0,7	M P ~ 0,8	M P ~ 0,5
							A ₁₀	A ₁₀ ± σ								
1	Мыс Сириха — п-ов Немуро	0—100	III?	0,7	0,99	0,69	1,2—3	0,8—4,5	6 ^{3/4}	7 ^{1/4} —7 ^{1/2}	7 ^{3/4}	0,61	4,4	—	—	
2	П-ов Немуро—о-в Зеленый	100—200	I	—	—	—	2,0	1,3—3,0	6 ^{1/4} —6 ^{1/2}	7	7 ^{3/4}	1,22	6,1	—	—	
3а	О-в Шикотан, Ю-В	200—300	I	—	—	—	1,4	0,9—2,1	6 ^{3/4}	7 ^{3/4} —8	7 ^{3/4} —8	1,07	5,3	—	—	
3б	» С-З	200—300	III?	0,24	0,76	0,18	1,2—3	0,8—4,5	6 ^{3/4}	7	7 ^{3/4} —8	1,50	6,7	—	—	
4	О-в Итуруп	300—450	I→II	—	—	—	1,3	0,9—2,0	6 ^{1/2}	7	7	3,68	7,5	+	+	
5	Пролив Фриза—о-в Уруп	450—600	II	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/2}	7	7	1,24	5,8	+	+	
6	Мыс Кастрикум — пролив Бусоль	600—750	II	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/2}	7	7	0,86	6,1	+	+	
7	О-в Смушир — пролив Кру-зенштерна	750—1000	III?	0,46	0,57	0,26	1,2—3	0,8—4,5	6 ^{3/4}	6 ^{3/4}	8 ^{1/4} —8 ^{1/2}	1,04	6,7	—	—	
8	О-в Шикотан	1000—1100	II	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/4}	6 ^{3/4}	8	1,22	5,5	—	—	
9	О-в Онекотан — пролив 3-й Курильский	1100—1200	III?	0,67	0,64	0,43	1,2—3	0,8—4,5	6 ^{3/4}	6 ^{3/4}	8	2,00	6,6	+	+	
10	О-в Парамушир — мыс Лопатка	1200—1350	II	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/2}	7	7	0,86	5,4	+	+	
11	Юг Камчатки	1350—1550	II	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/2}	7	7	1,02	5,3	—	—	
12а	Зал. Авачинский — п-ов Шипунский, Ю-В	1550—1700	II	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/2}	7	7	1,24	5,8	+	+	
12б	То же С-З	1550—1700	III?	0,09	0,44	0,04	1,2—3	0,8—4,5	6 ^{3/4} —7	6 ^{3/4} —7	8	2,61	5,7	—	—	
13	Зал. Кроноцкий	1700—1850	II	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/2}	7	7	1,53	5,6	+	+	
14	П-ов Кроноцкий — зал. Камчатский	1850—2000	II?	—	—	—	1,2	0,8—1,9	6 ^{1/2}	7	7	2,24	6,7	+	+	
14	П-ов Кроноцкий — зал. Камчатский	1850—2000	III?	0,52	0,7	0,36	1,2—3	0,8—4,5	6 ^{3/4} —7	6 ^{3/4} —7	8 ^{1/4}	2,24	6,7	+	+	
15	П-ов Камчатский	2000—2100	I→II	—	—	—	1,3	0,9—2,0	5 ^{3/4}	6 ^{3/4}	8 ^{1/4}	1,33	6,8	+	+	

Примечание: 1) Значки вопроса для участков, проходящих, по предположению, III стадию, означают, что нельзя достоверно сказать, проходит ли эти районы действительно стадию фогтсков; 2) в град «Оценка прогноза» для участков 5 и 8, помеченных знаком *, энергия проницающих землетрясений с $5 < M < 6$ эквивалентна энергиям землетрясений с $M=6$ и $M=5,7$, соответственно.

Курило-Камчатские землетрясения 1981—1986 гг. с $M \geq 7$ и $H \leq 80$ км

Год	Дата	Ч., мин., с.	Район	φ_N	λ_E	H, км	M
1982	30.VI	01.57.34	Напротив о-ва Уруп	44,6	151,2	31	7,1
1984	24.III	09.44.01	Напротив о-ва Итуруп	44,0	148,3	42	7,5
1984	28.XII	10.37.47,5	Напротив мыса Африка (Камчатка)	52,26	163,77	0—5	7,5

Онекотан и № 1 ($\Delta=0-100$ км)—район п-ова Немуро (см. рис. 1, табл. 1).

Некоторые из этих участков могли проходить III стадию сейсмического цикла (стадию форшоков), длящаяся 10—15 лет. Вероятность этого приближенно оценивается величиной произведения $B=P(A_{10}) \cdot P(D)$. Здесь A_{10} —сейсмическая активность, D —отношение сейсмической энергии, выделившейся на данной площади в рассматриваемый интервал времени, к сейсмической энергии, которая в среднем выделяется в исследуемой сейсмической области на равной площади за такое же время. В табл. 1 $P(A_{10})$ —вероятность того, что A_{10} (1976—1980) $> A_{10}(II)$, где $A_{10}(II)$ —средняя сейсмическая активность на II стадии сейсмического цикла (стадии стабильного режима); $P(D)$ —вероятность неравенства D (1976—1980 гг.) $> D(10-5)$, где D (1976—1980 гг.)—величина D для рассматриваемого участка за указанные годы, $D(10-5)$ —среднее значение D для равного по площади участка за 10—5 лет до землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$. Величина A_{10} и D имеют большой разброс, а подготовка части больших землетрясений не сопровождается усилением сейсмической деятельности в их очагах и на их периферии [11, 14]. Но в среднем, чем меньше произведение B , тем больше возможность того, что рассматриваемая вероятная область землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$ вступила в стадию форшоков. Для участков, находящихся во II стадии цикла или в начале III стадии, в среднем $B \geq 0,25$. Если же отклонения A_{10} и D от среднего уровня в большую сторону выходят за величину стандартного отклонения σ , то $B < 0,03$, и вероятность того, что происходит подготовка землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$, достаточно высока. Судя по этому признаку, среди шести вероятных участков следующих таких землетрясений, сейсмических брешей в полосе прогноза, стадию форшоков мог проходить участок № 126—район Авачинского залива ($B=0,04$). В остальных пяти участках $B=0,18-0,69$ (см. рис. 1, табл. 1).

В Курило-Камчатской области в 1981—1985 гг. не произошло землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$. Землетрясений с $7,0 < M < 7,7$ было три: 30.VI 1982 г. с $M=7,1$, напротив о-ва Уруп, вблизи глубоководного желоба, 24.III 1984 г. с $M=7,5$ напротив о-ва Итуруп, между очагами землетрясений 06.XI 1958 г. и 11.VIII 1969 г. с $M=8,2$ и роем землетрясений 22—24.III 1978 г. с $M=7,1-8,0$ и землетрясение 28.XII 1984 г. с $M=7,5$ напротив мыса Африка на Камчатке. Сведения об этих землетрясениях приведены в табл. 2 и на рис. 2 (см. ниже).

Необходимо отметить, что на возможность в 1983—1984 гг. землетрясения с $M \geq 7,3$ напротив о-ва Кунашир указывалось в прогнозе А. М. Шурыгина и М. Г. Одинец [17]. Хотя землетрясение 24.III 1984 г. произошло примерно в 200 км восточнее указанного в статье места, прогноз все же можно считать оправдавшимся, так как эпицентр лежит на восточной границе 300-километровой области, в которой ожидалось землетрясение.

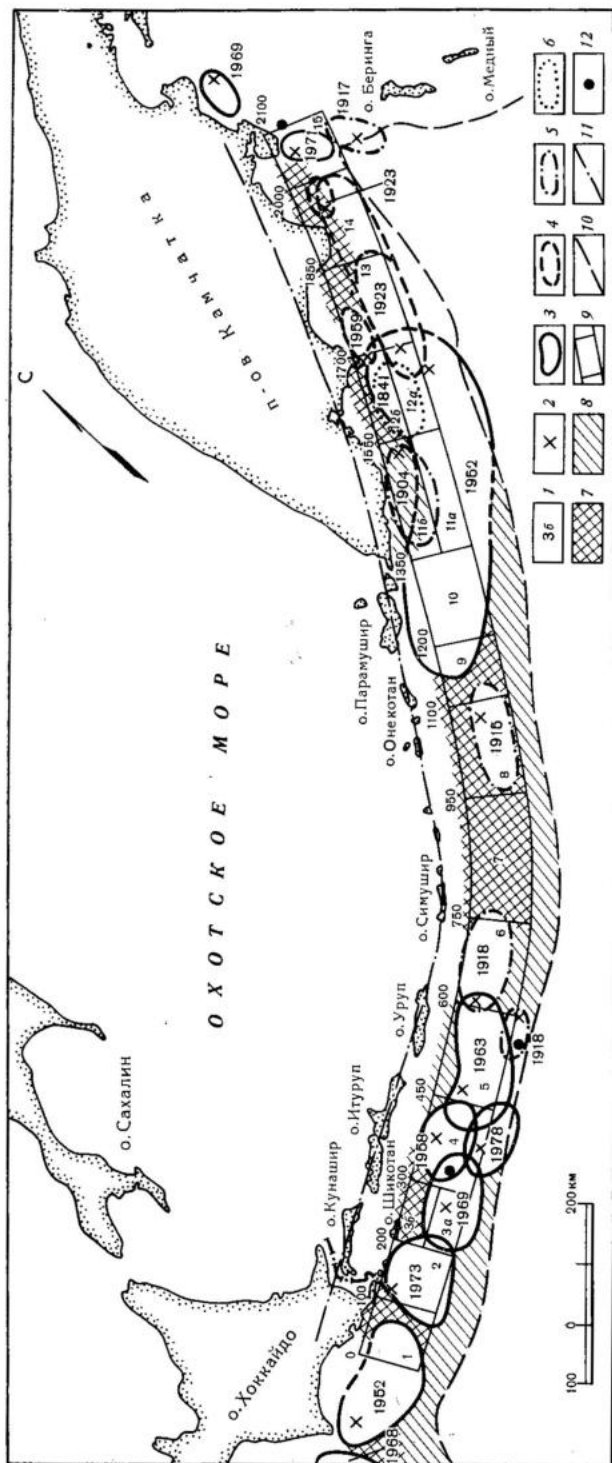


Рис. 2. Карта очагов Курило-Камчатских землетрясений 1904—1985 гг. с $M \geq 7^{3/4}$, $H \leq 80$ км и вероятных мест следующих таких землетрясений. 1 — номер участка (названия см. в табл. 5); 2 — инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$; 3 — границы областей очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, проведенные с точностью ± 10 км; 4 — участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 — вероятные области очагов землетрясений 1904—1918 гг. с $M \geq 7^{3/4}$; 6 — предполагаемая область очага землетрясения 1841 г.; 7 — наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$; 8 — возможные места следующих таких землетрясений; 9 — граница полосы прогноза; 10 — оси глубоководных желобов; 11 — ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 12 — эпицентры землетрясений с $7,0 < M < 7,7$, происшедших в 1981—1985 гг.

Очаг землетрясения 28.XII 1984 г. с $M=7,5$ у побережья Камчатки заполнил часть пространства между очагами Усть-Камчатского землетрясения 15.XII 1971 г. с $M=7,8$ и Озерновского землетрясения 22.XI 1969 г. с $M=7,7$. Положение эпицентра этого землетрясения показывает, что в районе Камчатского полуострова продолжается разрядка напряжений, начавшаяся Озерновским землетрясением 22.XI 1969 г. Однако, так как уровень сейсмичности в этом районе достаточно низкий, трудно достоверно говорить о возможности там землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$.

В последних графах табл. 1 для каждого из 15 участков приведены фактические значения сейсмической активности A_{10} за 1981—1985 гг. и указаны магнитуды сильнейших землетрясений, происшедших в эти годы. Данные о землетрясениях взяты из сборников «Землетрясения в СССР» [5], ежеквартальных сборников «Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока» [9] и регионального каталога землетрясений Камчатки. В графах «Оценка прогноза» отмечен успех (+) или неудача (—) прогноза для всех случаев, когда прогноз давался для участков, проходящих стадию афтершоков (I) или стадию стабильного сейсмического режима (II).

Значения сейсмической активности A_{10} в девяти случаях из 11 оказались в пределах, прогнозирувавшихся с вероятностью 0,7. Для участка № 2 ($\Delta=100-200$ км) более низкий, чем ожидалось, уровень сейсмической активности $A_{10}=1,22$ может означать, что стадия афтершоков (I) землетрясения 17.VI 1973 г. с $M=7,9$ почти завершилась и участок № 2 переходит в длительную стабильную стадию II. Аномально высокое значение сейсмической активности $A_{10}=3,68$ для участка № 4 ($\Delta=300-450$ км) может быть связано с землетрясением 24.III 1984 г. с $M=7,5$, которое в свою очередь может быть вызвано продолжающейся разрядкой напряжений в сложной напряженной зоне, находящейся между очагами больших землетрясений 1958, 1969 и 1978 гг.

Прогноз магнитуд землетрясений оказался менее успешным, чем прогноз сейсмической активности. Землетрясения с магнитудами $M=5^{3/4}-6^{1/2}$, ожидавшиеся с вероятностью 0,8, произошли в трех случаях из 11, а землетрясения с магнитудами $M=6^{1/4}-7$, ожидавшиеся с вероятностью 0,5, произошли в двух случаях из 11. Для участков № 5 ($\Delta=450-600$ км) и № 8 ($\Delta=1000-1100$ км) суммарная энергия происшедших землетрясений с $5 < M < 6$ эквивалентна магнитудам землетрясений, ожидавшихся для этих участков с вероятностью 0,8. Однако формально можно считать, что прогноз магнитуд для этих участков был неудачен.

В главном оценка долгосрочного сейсмического прогноза, сделанного для Курило-Камчатской дуги на 1981—1985 гг., сводится к следующему. В это пятилетие не представилась возможность проверить прогноз вероятных мест землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, так как их не было. Прогноз сейсмической активности, которая представляет прежде всего нормированное число слабых землетрясений, оправдался в девяти случаях из 11 при вероятности прогноза 0,7. Землетрясения с $M=5^{3/4}-6^{1/2}$, ожидавшиеся с вероятностью 0,8, произошли только в трех — пяти случаях из 11. Последнее обстоятельство в значительной мере объясняется тем, что в 1981—1985 гг. в Курило-Камчатской области было относительное сейсмическое затишье, количество высвободившейся сейсмической энергии и землетрясений с $M \geq 6$ было существенно ниже среднего.

Общая оценка достоверности долгосрочного прогноза за 20 лет, 1965—1985 гг.

Далее рассмотрим эффективность применяемой методики долгосрочного сейсмического прогноза за все 20 лет ее использования в Курило-Камчатской области: 1965—1970, 1971—1975, 1976—1980 и 1981—1985 гг. На эти четыре пятилетия для всей сейсмогенной зоны длиной

Инструментальные данные о сильнейших землетрясениях ($M \geq 7^{3/4}$, $H \leq 80$ км) Курильских островов, Камчатки и Северо-Восточной Японии, происшедших в 1965—1985 гг.

Год	Дата	Ч, мин, с	Район	φ_N	λ_E	H, км	M
1968	6.V	00.48.53	Восточнее севера о-ва Хонсю	40,73	143,58	0	7,9
1969	11.VIII	21.27.36 \pm 2	Восточнее о-ва Шикотан	43,6 \pm 0,2	147,8 \pm 0,2	40 \pm 10	8,2 \pm 0,2
	11.VIII	21.27.41 \pm 5	Там же	43,6 \pm 0,3	147,2 \pm 0,3	38 \pm 15	7,8 \pm 0,5
1971	15.XII	08.29.55 \pm 2	Восточнее п-ова Камчатский	55,85 \pm 0,1	163,35 \pm 0,1	20—30	7,8 \pm 0,1
1973	17.VI	03.55.02 \pm 1	Восточнее п-ова Немуро—Малой Курильской гряды	43,15 \pm 0,2	145,9 \pm 0,2	55 \pm 10	7,9 \pm 0,2
1978	23.III	03.15.23 \pm 1	Восточнее о-ва Итуруп	43,9	148,9	40	7,8
1978	24.III	19.47.50 \pm 1	Там же	43,9	149,1	39	8,0

2100 км давался прогноз вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, а для ее наиболее сейсмичной полосы шириной 100 км делались также оценки стадий сейсмического цикла, ожидаемых величин сейсмической активности A_{10} и вероятности землетрясений с $M < 7^{3/4}$. Сопоставление прогнозов этих величин с действительной сейсмичностью позволяет получить представительные оценки.

Рассмотрим в первую очередь размещение областей очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ и заполнение ими прогнозирувавшихся вероятных областей таких землетрясений, которые чаще стали называться в литературе сейсмическими брешами или «seismic gaps». Отметим, что по нашей методике их выделение производится более тщательно, чем это обычно делается.

В 1965—1985 гг. в той части Курило-Камчатской дуги, для которой давались прогнозы вероятных мест землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, (см. рис. 1), произошло четыре таких землетрясения: 11.VIII 1969 г. с $M = 8,2$ против островов Кунашир и Итуруп; 15.XII 1971 г. с $M = 7,8$ в Камчатском проливе между Камчаткой и о-вом Беринга; 17.VI 1973 г. с $M = 7,9$ против о-ва Кунашир и рой землетрясений 22—24.III 1978 г. с $M = 7,1—8,0$ против о-ва Итуруп (см. рис. 1, табл. 3). Все они произошли в тех местах Курило-Камчатской сейсмической зоны, где такие землетрясения ожидалось по долгосрочному прогнозу 1965 г. [10]. Кроме того, 6.V 1968 г., восточнее северной части о-ва Хонсю произошло землетрясение с $M = 7,9$ в той области, которая также была отнесена к наиболее вероятным местам следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, по тому же прогнозу [10]. Таким образом, такой прогноз оказался верным для всех пяти землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, которые произошли в 1965—1985 гг. у Тихоокеанского побережья Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии. При создании методики предполагалось, что вероятность таких прогнозов будет примерно 0,8.

Далее рассмотрим эффективность долгосрочного прогноза сейсмичности в наиболее активной полосе.

Рассмотрим сначала те участки полосы, в которых в течение 80 лет и более не было землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$. По нашей методике допускается, что все они могут проходить III стадию сейсмического цикла (форшоков), которая длится 10—15 лет, и для них прогнозируются соответствующие величины A_{10} и M_{\max} (см. например, табл. 1). Вероятность того, что участок стал проходить стадию форшоков землетрясения с

Достоверность долгосрочного прогноза A_{10} и M для Курило-Камчатской дуги
в 1965—1985 гг.

Вероятность ожидания прогнозируемых значений A_{10} и M		Оправданность прогноза A_{10} и M за предыдущие пятилетия и в целом в 1965—1985 гг., %				
		1965—1970 гг.	1971—1975 гг.	1976—1980 гг.	1981—1985 гг.	1965—1985 гг.
A_{10}	$P=70\%$	86	50	73	82	73
M	$P=80\%$	86	86	73	27	65
M	$P=50\%$	43	50	27	18	32

Примечание. Прогноз A_{10} и M дается для наиболее сейсмичной полосы дуги шириной 100 км, рис. 1.

$M \geq 7^{3/4}$, оценивается по степени уменьшения произведения вероятностей $B = P(A_{10})P(D)$, как это описано в предыдущем разделе.

В прогнозах на 1971—1975, 1976—1980 и 1981—1985 гг. выделялось по оценкам за 1965—1980 гг. по шесть участков наиболее активной полосы, которые могли проходить III стадию цикла [12—14]. Среднее из 18 определений величины B имеет значение $B = 0,23 \pm 0,18$, где $\pm 0,18$ — среднее квадратическое отклонение единичного определения B .

В пяти случаях из 18 наблюдались низкие значения $B = 0,01—0,05$. Землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$ произошли в наиболее сейсмичной полосе дуги, именно в выделявшихся участках, т. е. прогноз места следующих таких землетрясений был верным. Таких землетрясений было только два на те 18 случаев, когда допускалась возможность III стадии цикла (см. землетрясения № 3 и 4, табл. 3). Естественно, что среднее значение $B = 0,23$ оказалось близким к его средней величине $B \approx 0,25$, характерной для I[†] — начала III стадии. Однако значения B перед двумя названными землетрясениями с $M \geq 7^{3/4}$ равнялись 0,15 и 0,32 и признак B здесь не был показательным.

Из пяти низких значений $B = 0,01—0,05$ одно наблюдалось после землетрясения 17.VI 1973 г. с $M = 7,9$ в области его афтершоков, и его следует исключить как аномальное. Одно значение наблюдалось в 1971—1975 гг. в районе о-ва Онекотан, участок № 9 $\Delta = 1100—1200$ км и еще одно в районе п-ова Кроноцкий, участок № 14 $\Delta = 1850—2000$ км (см. рис. 1). Наибольшее внимание привлекают два оставшихся значения $B = 0,03—0,04$, которые устойчиво сохранялись в Авачинском заливе в прогнозах на 1976—1980 и 1981—1985 гг. (по оценкам за 1971—1980 гг.), участок 126 (см. табл. 1), $\Delta = 1550—1700$ км (см. рис. 1). Кроме того, в прогнозе на следующее пятилетие, 1986—1990 гг. (см. последний раздел статьи), по оценке за 1981—1985 гг. опять можно выделить участки № 9, 126 и 14.

Значения сейсмической активности A_{10} прогнозировались с вероятностью 0,7 по графику изменения сейсмической активности в течение I, II и III стадий сейсмического цикла [11, 14]. Для участков, проходящих I или II стадии цикла (стадию афтершоков и стадию стабильного сейсмического режима) величины A_{10} были предсказаны в 27 случаях из 37, т. е. в 73% случаев (табл. 4). Напомним, что сейсмическая активность A_{10} в нашем случае — это число землетрясений энергетического класса $K_{SI,2}^{Ф88} = 10 \pm 0,5$ (или $M = 3,6 \pm 0,3$) в год на площади 10^3 км².

Как можно видеть, действительная вероятность прогноза числа слабых землетрясений для участков Тихоокеанского побережья Камчатки и Курильских островов протяженностью 100—250 км по пятилетним интервалам времени почти совпала с ожидаемой.

Вероятность землетрясений с $M = 5^{3/4}—7$ в разных участках сейсмогенной зоны оценивается при помощи графика высвобождения сейсмической энергии $D(t)$ в течение сейсмического цикла.

Землетрясения с магнитудой $M=5^{3/4}-6^{1/4}$, ожидавшиеся с вероятностью 0,8 в течение пятилетних интервалов времени в выделенных участках Курило-Камчатской дуги, произошли в 24 случаях из 37, т. е. в 65% случаев; землетрясения с $M=6^{1/4}-7$, ожидавшиеся с вероятностью 0,5, произошли в 12 случаях из 37, т. е. в 32% случаев (см. табл. 4). Как видно в табл. 4, прогноз землетрясений с $M=5^{3/4}-7$ был успешным в 1965—1970, 1971—1975 гг. и оказался наименее правильным в 1981—1985 гг. Как уже отмечалось, последнее расхождение в значительной мере объясняется снижением сейсмической деятельности по всей Курило-Камчатской дуге в 1981—1985 гг. В среднем за 20 лет для участков, проходивших I стадию (афтершоков) и II стадию (стабильного режима или обычной сейсмичности) сейсмического цикла, количество землетрясений с $M=5^{3/4}-7$ оказалось меньшим, чем это ожидалось по графику высвобождения сейсмической энергии $D(t)$. Отметим другие возможные причины такого расхождения, кроме временного снижения сейсмичности в последнее пятилетие.

Статистика ухудшается также из-за группирования сильных землетрясений. Тому же способствует асимметрия в распределении величины D относительно среднего значения в течение сейсмического цикла. Эта асимметрия видна на сводном эмпирическом графике значений D в течение сейсмического цикла [14]. Она не принималась во внимание из-за большого разброса величин D . Однако мода графика $D(t)$ лежит ниже его среднего, что приводит к некоторому завышению прогнозируемых величин D и M .

Несмотря на эти отклонения, долгосрочный прогноз величин M по зависимости $D(t)$ значительно лучше прогноза по графикам повторяемости $\lg N = -b \cdot M + a = -\gamma K + c$, который дает величины M в среднем на 0,15 больше, чем по $D(t)$. Одна из причин этого расхождения в том, что график повторяемости не учитывает дефицита землетрясений с $M > 6$ на II стадии сейсмического цикла.

В целом долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги был успешным в 1965—1985 гг., его эффективность подтвердилась при 20-летней проверке.

Сейсмический прогноз на 1986—1990 гг.

При составлении долгосрочного сейсмического прогноза на следующее пятилетие, 1986—1990 гг., были внесены некоторые изменения в карту размещения очагов сильнейших курило-камчатских землетрясений (рис. 2).

При составлении прогноза в 1965 г. магнитуды землетрясений были взяты из «Атласа землетрясений в СССР» [1]. При уточнении методики прогноза в работе [14] и в дальнейшем магнитуды сильнейших землетрясений брались из «Нового каталога» [8]. Для 45 землетрясений Курило-Камчатского региона с $M_{\text{нк}} \geq 7,0$ (по «Новому каталогу») за период с 1911 по 1956 г. сопоставлены $M_{\text{атл}}$ (из «Атласа землетрясений...») с $M_{\text{нк}}$ из «Нового каталога». В среднем для всей дуги $\Delta M = M_{\text{нк}} - M_{\text{атл}} = 0,24 \pm 0,26$. Это означает, что при учете округления магнитуд «Атласа...» до $1/4$ и погрешности в определении магнитуд «Нового каталога», нижний предел магнитуд рассматриваемых сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона равен $M=7,8$. Исходя из этого область очага землетрясения 31.VII 1915 г. на Камчатке, имеющего $M=7,3$ в «Новом каталоге», снята с карты прогноза.

В работе [2] было предложено новое положение очага землетрясения 30.I 1917 г. с $M=8,1$ на севере Курило-Камчатской дуги. Оно рассматривается как более предпочтительное по сравнению с прежним.

В той же работе [2] сделана попытка уточнить границы области очага крупного Камчатского землетрясения 3.II 1923 г. с $M=8,5$. Однако

точных данных нет, не со всеми выводами работы [2] можно согласиться, и положение области очага землетрясения 3.II 1923 г. на Камчатке оставлено без изменений (см. рис. 1, рис. 2).

По-прежнему мы рассматриваем очаг этого землетрясения в двух вариантах, так как нельзя достоверно сказать, было ли землетрясение 24.II 1923 г. с $M=7,7$ («Новый каталог») самостоятельным событием или афтершоком основного землетрясения 3.II 1923 г. Условная область очага землетрясения 24.II 1923 г. с $M=7,7$ нанесена в северной части очага основного события с $M=8,5$ 3.II 1923 г.

Более тщательное рассмотрение афтершоков землетрясения 1.V 1915 г. с $M=8,3$ южнее о-ва Онекотан и учет графика зависимости $M(L)$ (рис. 3), дополненного новыми сведениями о размерах очагов девяти землетрясений Курилы, Камчатки и Северо-Восточной Японии, позволило увеличить длину области очага этого землетрясения до 200 км. При этом участок № 7 — Средние Курилы, который является одним из вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7,8$, уменьшился на 50 км.

Длительность сейсмического цикла принята равной 140 ± 60 лет, поэтому формально область очага роя землетрясений 25.VI 1904 г. с $M=7,7$ и 7,7 можно рассматривать с 1986 г. как потенциально опасную для следующего катастрофического землетрясения. Поэтому участок № 11 разделен на два, в одном из которых (№ 11б) предполагается стадия III.

В табл. 5 приведен долгосрочный сейсмический прогноз на текущее пятилетие 1986—1990 гг. для 15 участков наиболее активной полосы Курило-Камчатской дуги. Для всех 15 участков указаны стадии цикла (III стадия предположительно), которые они проходят, и дана качественная оценка наибольшей опасности для районов, предположительно проходящих стадию форшоков. По оценке $B=P(A_{10}) \cdot P(D)$ по данным за 1981—1985 гг. выделяются четыре из семи наиболее опасных участков, где $B=0,015-0,03$: участок № 9 ($\Delta=1100-1200$ км) — напротив о-ва Онекотан, № 14 ($\Delta=1850-2000$ км) — Кроноцкий полуостров — Камчатский залив, № 126 ($\Delta=1550-1700$ км) — Авачинский залив, № 36 ($\Delta=200-300$ км) — район о-ва Шикотан (см. табл. 5, рис. 2).

Вновь привлекает внимание район Авачинского залива, участок № 126, где в 1981—1985 гг., как и в 1971—1980 гг., отмечается низкое значение B .

Для всех семи участков, в которых предполагается возможность III стадии цикла, приведены значения максимальных возможных магнитуд M_{\max} .

Для остальных участков в соответствии со стадией цикла (I или II) по графикам $A_{10}(t)$ и $D(t)$ прогнозируются с вероятностью 0,7 интерва-

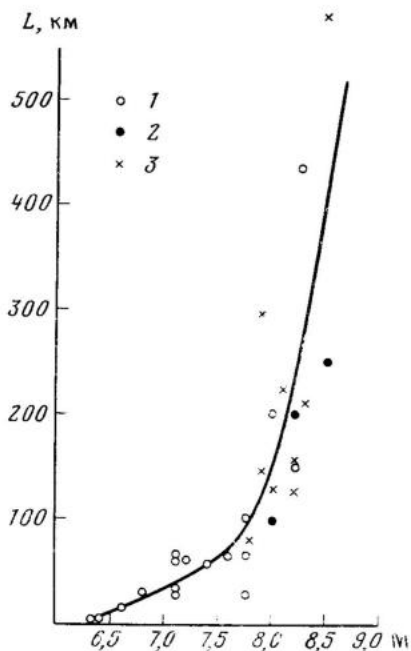


Рис. 3. Зависимость длины области очага L от магнитуды M для сильных землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса. 1 — величина L определена по данным полевых обследований [10]; 2 — величина L определена по размещению эпицентров форшоков и афтершоков [10]; 3 — величина L определена по размерам областей очагов землетрясений Курило-Камчатской дуги и Северо-Восточной Японии в 1952—1978 гг. [14], рис. 2

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 1986—1990 гг. ($r = 50-150$ км, $h \leq 80$ км)

Участок, № (см. рис. 2)	Район	Δ, км	Стадия цикла и ее оценка по данным 1981—1985 гг.				Прогноз на 1986—1990 гг.						M _{max}
			стадия	P(N ₀)	P(D)	P(A ₁₀) P(D)	A ₁₀ (P~0,7)		M				
							стадия	P(N ₀)	P(D)	P(A ₁₀) P(D)	Δ̄ ₁₀	Δ̄ ₁₀ ± σ	
1	Мыс Сириха — п-ов Немуро	0—100	III?	0,96	0,99	0,95	1,2—3	0,8—4,5	6,1	6,5	7,1	> 5	7 ³ / ₄
2	П-ов Немуро — о-в Зеленый	100—200	I→II				1,3	0,9—2,0	6,6	6,6	6,7	< 5	
3а	О-в Шикотан, Ю-В	200—300	II				1,2	0,8—1,9	5,7	6,2	6,7	< 5	7 ³ / ₄ —8
3б	» С-З	200—300	III?	0,33	0,09	0,03	1,2—3	0,8—4,5		6,3		> 5	
4	О-в Итуруп	300—450	II				1,3	0,9—2,0	6,0	6,5	7,0	< 5	
5	Пролив Фриза — о-в Урул	450—600	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
6	Мыс Кастрикум — пролив Буссоль	600—750	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
7	О-в Симушир — пролив Кру-зенштерна	750—950	III?	0,67	0,33	0,22	1,2—3	0,8—4,5	5,9	6,7	6,9	> 5	8 ¹ / ₄
8	О-в Шикотан	950—1100	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
9	О-в Онекотан: — пролив 3-й Курильский	1100—1200	III?	0,13	0,12	0,015	1,2—3	0,8—4,5		6,5		> 5	7 ³ / ₄ —8
10	О-в Парамушир—мыс Лопатка	1200—1350	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
11а	Юг Камчатки, Ю-В	1350—1550	II				1,2	0,8—1,9	5,8	6,3	6,7	< 5	
11б	» С-З	1350—1550	III?	0,69	0,95	0,65	1,2—3	0,8—4,5		6,5		< 5	8
12а	Зал. Авачинский — п-ов Шипунский, Ю-В	1550—1700	II				1,2	0,8—1,9	5,7	6,2	6,7	< 5	
12б	То же, С-З	1550—1700	III?	0,04	0,64	0,025	1,2—3	0,8—4,5		6,4		> 5	8
13	Зал. Кроноцкий	1700—1850	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
14	П-ов Кроноцкий—зал. Камчатский	1850—2000	II?				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
15	П-ов Камчатский	2000—2100	III?	0,08	0,24	0,02	1,2—3	0,8—4,5	6,0	6,6	7,0	> 5	8—8 ¹ / ₄
			I→II				1,3	0,9—2,0		6,5		< 5	

Примечание. Знаки вопроса для участков, по предположению проходящих III стадию, означают, что нельзя достоверно проходить III стадию, проходят ли эти районы действительно стадии форшоков.

лы возможных значений сейсмической активности, а также нижние пределы магнитуд землетрясений, ожидающихся с вероятностями 0,8; 0,5 и 0,15.

Для района № 14 прогноз дан, как и прежде, в двух вариантах, так как не совсем ясно расположение северной границы области очага землетрясения 1923 г.

В дополнение к уточненному прогнозу по нашей методике приведем другие оценки сейсмической обстановки для Камчатки.

В работе [16] приводится долгосрочный сейсмический прогноз периодов пониженной и повышенной вероятности сильных землетрясений Камчатки с $M \geq 7,0$ на 1987—1992 гг., сделанный на основе наблюдений сейсмичности в течение периода изменения склонения Луны ($T = 18,61$ г.). По этому прогнозу с июля 1986 г. по август 1989 г. будет наблюдаться фаза покоя $P(N \geq 1, M \geq 7^{1/4}) \simeq 0,1$, $M_{\max} = 7^{1/4}$, а с сентября 1989 по сентябрь 1992 г. будет длиться активная фаза с повышенной вероятностью возникновения землетрясений с $M \geq 7,0$, $P(N \geq 1, M \geq 7,0) = 0,83$, $M_{\max} = 8^{1/2}$.

Наглядное представление о сейсмической обстановке в районе Камчатки дает кумулятивный график сейсмической энергии, высвобожденной в 1900—1986 гг., приведенный в [15]. Из него следует, что спокойное накопление упругой энергии для сейсмофокальной зоны Камчатки ($H < 100$ км) может продлиться максимум еще примерно 10 лет, после чего с большой вероятностью может наступить разрядка накопленных напряжений. Возможна серия землетрясений с $M \sim 8$.

Аналогичный график для Курильских островов показывает, что большая часть накопленной сейсмической энергии уже сброшена в основном серией южно-курильских землетрясений 1958—1978 гг., и сейчас район Курильских островов переходит в длительную стадию накопления сейсмической энергии.

Приведенная в той же работе [15] карта изолиний D за 1962—1983 гг. для Камчатки показывает расположение зон больших градиентов выделения сейсмической энергии за последние 22 года. Основные градиентные зоны приурочены к районам Авачинского залива и Кроноцкого полуострова. Все эти особенности показывают, что районы Авачинского залива и Кроноцкого полуострова в настоящее время действительно являются одними из самых опасных районов Курило-Камчатской дуги.

Заключение

Накоплен 20-летний опыт долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии, методика которого была изложена в 1965—1968 гг. [10, 11]. Главный вывод из его рассмотрения, которое было сделано выше, заключается в том, что прогноз был успешным и что имеется необходимость продолжать его.

Одновременно стало ясно, в какой мере достоверны разные стороны этого прогноза. С вероятностью больше предполагавшейся величины 0,8 выделялись места следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$. С ожидавшейся вероятностью 0,7 предсказывались значения сейсмической активности A_{10} в 15 участках полосы Курило-Камчатской дуги. Менее удачными были оценки вероятности вступления в длительную стадию форшоков тех участков, которые являются вероятными местами следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ (сейсмическими брешами, «seismic gaps»), а также оценки вероятности землетрясений с $M = 5^{3/4} - 7$ в отдельных участках.

В данной работе внесен ряд улучшений в технику прогноза, и с их учетом составлен долгосрочный прогноз для Курило-Камчатской дуги на 1986—1990 гг.

Продолжая ведение долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги по применяемой методике [10, 11, 14; и др.], целесообразно одновременно совершенствовать его, для чего имеются различные возможности. В описанной методике мало использованы особенности миграции сейсмичности, связанные с подготовкой больших землетрясений. Необходимо тщательное изучение сейсмичности на III стадии сейсмического цикла, сейсмостатистики, исследование напряженного состояния в очагах больших землетрясений и во всей сейсмичной области и др. Такие исследования, применение развиваемой методики в других регионах со сходной сеймотектоникой и сочетание этой методики с иными способами долгосрочного сейсмического прогноза должны привести к повышению его надежности, детальности и предсказанию других характеристик сейсмичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас землетрясений в СССР (1911—1956 гг.). М.: Изд-во АН СССР, 1962. 337 с.
2. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова//Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 72—83.
3. Гвишиани А. Д., Зелевинский А. В., Кейлис-Борок В. И., Кособоков В. Г. Распознавание участков Тихоокеанского пояса, где возможны сильнейшие землетрясения ($M \geq 8,2$)//Вычислительная сейсмология. Вып. 13. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных. М.: Наука, 1980. С. 30—43.
4. Завьялов А. Д. Параметр концентрации сейсмогенных разрывов как предвестник сильных землетрясений Камчатки//Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 58—71.
5. Землетрясения в СССР//Ежегодники за 1981—1985 гг. М.: Наука, 1984, 1985, 1986, 1987.
6. Кейлис-Борок В. И., Кособоков В. Г. Периоды повышенной вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира//Вычислительная сейсмология. Вып. 19. Математические методы в сейсмологии и геодинимике. М.: Наука, 1986. С. 48—58.
7. Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии//Под ред. Асада Т.: Пер. с англ. М.: Недра, 1984. 312 с.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
9. Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока//Ежеквартальные бюллетени за 1981—1984 гг. Южно-Сахалинск, 1982, 1984, 1985, 1986, 1987.
10. Федотов С. А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии//Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. 1965. № 36(203). С. 66—93.
11. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
12. Федотов С. А. Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Тихоокеанской фокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965—1970 гг. и уточненный прогноз на 1971—1975 гг.//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 101—109.
13. Федотов С. А., Чернышев С. Д. Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на 1976—1980 гг. и прогноз на 1981—1985 гг.//Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 74—80.
14. Федотов С. А., Чернышев С. Д., Чернышева Г. В., Викулин А. В. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги//Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52—67.
15. Федотов С. А., Шумилина Л. С., Чернышева Г. В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований//Вулканология и сейсмология. 1987. № 6.
16. Широков В. А. Влияние девятнадцатилетнего лунного прилива на возникновение больших извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз//Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975—1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 164—170.
17. Шурьгин А. М., Одинец М. Г. Долгосрочный статистический прогноз пространственно-временной плотности сильных землетрясений для Курильских островов//Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 92—102.
18. Earthquake Prediction. An International Review//Amer. Geophys. Union, Manrice Ewing Series. V. 4. Wash., 1981. 680 p.
19. Fedotov S. A., Sobolev G. A., Boldyrev S. A., Gusev A. A., Kondratenko A. M., Po-

- tapova O. V., Slavina L. B., Pheophylaktov V. D., Khromov A. A., Shirokov V. A.* Long- and short-term earthquake prediction in Kamchatka//Tectonophysics. 1977. V. 37. P. 305—321.
20. *Kelleher J., Sykes L., Oliver J.* Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean//J. Geophys. Res. 1973. V. 78. № 14. P. 2547—2585.
 21. *Mogi K.* Sequential occurrence of recent great earthquakes//J. Phys. Earth. 1968. V. 16. P. 30—36.
 22. *Mogi K.* Earthquake Prediction. Tokyo: Acad. Press Japan, Inc., 1985. 355 p.
 23. *Mogi K.* Recent Earthquake Prediction Research in Japan//Science. 1986. V. 233. P. 324—330.
 24. Proceedings of Conference VI Metodology for Identifying Seismic Gaps and Soon-to-Break Gaps. California, 1978. 924 p.
 25. *Rikitake T.* Earthquake Forecasting and Warning. Tokyo: Cent. Acad. Publ. Japan, 1982. 402 p.
 26. *Wyss M., Haberman: R. E.* Seismic quiescence precursory to a past and a future Kurile Island earthquake//Pure and Appl. Geophys. 1979. V. 117. № 6. P. 1195—1221.

Институт вулканологии ДВО АН СССР
Институт физики Земли АН СССР

Поступила в редакцию
3.VIII.1987

ТОКАРЕВ П. И.

**ХАРАКТЕРИСТИКА И ПОВТОРЯЕМОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ
ИЗВЕРЖЕНИЙ****Введение**

QUANTITATIVE CHARACTERISTICS AND RECURRENCE OF VOLCANIC ERUPTIONS, by Tokarev P. I. The volume of erupted material, magma discharge, and coefficient of explosivity are considered as the main factors that essentially specify the power, intensity, and character of the eruption. The data on eruptions of the world for the last 10 000 years and on eruptions in the Kuril-Kamchatka zone that occurred in 1901—1980 show a linear dependence between the frequency of occurrence (in logarithmic scale) and classes of eruptions.

(Received May 19, 1986)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Вулканология — молодая наука, носившая в начале своего возникновения описательный характер. Лишь постепенно возникла необходимость количественного описания отдельных явлений вулканизма, стали вводиться различные шкалы и единицы измерения, новые понятия и термины, характеризующие извержения [2, 4—9]; на подробном описании и анализе их мы останавливаться не будем, вулканологам они хорошо известны. При этом существовало две тенденции. Первая стремилась для всего разнообразия извержений создать единую шкалу, вторая — использовать не общепринятые физические величины, а относительные, традиционно применяемые в смежных науках, такие, как баллы, магнитуды, индексы и даже «эквивалент атомной бомбы». Само понятие «извержение» до сих пор точно не определено и различные вулканологи вкладывают в него различный смысл [1, 3]. Все это создает определенные трудности при практической работе.

Общеизвестно, что чем сильнее извержения, тем реже они происходят. Однако количественные соотношения между частотой и силой извержений пока не установлены.

В этой статье сделана попытка уточнить определения «извержение» и «вулканическая активность», а также методы их количественной характеристики. При этом автор не ставил задачи пересмотра вулканологической терминологии и количественных характеристик извержений, а стремился только пояснить и уточнить термины и понятия, которые наиболее часто употребляются при изучении сейсмического режима вулканов и разработке методов прогноза вулканических извержений. Он попытался также найти количественную зависимость между частотой извержений и их величиной. Следует указать, что приводимые в статье термины и характеристики извержений в подавляющем большинстве не являются новыми предложенными автором.

Вулканический цикл

По определению, вулкан — это место выхода магмы на поверхность Земли. Этим термином обозначаются и конические горы, возникшие в результате отложения материала во время извержений. В более широ-

ком смысле под словом вулкан понимается система, состоящая из конусообразной горы на поверхности Земли с кратером на вершине, подводного канала в земной коре, первичного магматического очага и зоны его питания в верхней мантии Земли. По форме строения наземных аппаратов и их корневых частей вулканы весьма разнообразны. В их деятельности выделяются два основных состояния: **покоя и извержения**. С развитием инструментальных наблюдений стало возможным и необходимым выделить третье состояние, промежуточного между основными, отражающего скрытые, глубинные процессы, связанные с движением магмы на глубине перед выходом ее на поверхность Земли. Оно определяется как **состояние подготовки извержения**. Во время извержения и после его прекращения происходит резкое уменьшение давления в выводном канале и снижение напряжений, возникших в период подготовки извержения. Назовем его **состоянием релаксации напряжений**. Таким образом, в деятельности вулкана кроме двух основных выделяются еще два промежуточных состояния. Скрытые процессы в период подготовки извержений и релаксации напряжений отражаются в значительных аномальных деформациях земной поверхности, в резком изменении частоты и энергии вулканических землетрясений, в изменении фумарольной деятельности вулкана и т. п.

У полигенных вулканов извержения происходят периодически, дискретно, разделяясь интервалами покоя. Состояние вулкана между концами двух смежных извержений назовем вулканическим циклом, а его продолжительность — **периодом вулканического цикла**. Обозначим его через T . Вулканический цикл делится на четыре фазы: фазу I — **покоя**, фазу II — **подготовки извержения**, фазу III — **извержения** и фазу IV — **релаксации напряжений**. Продолжительность каждой фазы будем обозначать соответственно через T_1 , T_2 , T_3 и T_4 ; $T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$. Каждая фаза может подразделяться на несколько **этапов**, их будем обозначать номером фазы с индексом. Например, III₁, III₂ и т. д., что означает первый и второй этапы фазы извержения. Схема вулканического цикла и характер изменения давления в выводном канале в продолжение цикла показаны на рис. 1.

Состояние покоя вулкана — такое его состояние, когда вулкан не проявляет никаких видимых признаков деятельности, кроме обычной для него фумарольной деятельности, т. е. когда нет извержения.

Фумарольная деятельность — выделение вулканических газов и паров воды из кратера вулкана или на его внешних склонах. Фумарольная деятельность наблюдается также на лавовых и агломератовых потоках, воронках взрывов, трещинах и т. п. Интенсивность фумарольной деятельности вулкана варьирует в больших пределах — от незначительного слабого парения до обильного и интенсивного выделения газов, сопровождающегося сильным шумом. К фумарольной деятельности следует относить выделение из кратера газов любой интенсивности, если при этом на поверхность Земли не выносятся магма. При фумарольной деятельности форма и глубина дна кратера не изменяются, так как магма или холодный твердый материал не выносятся из выводного канала на поверхность.

Извержение вулкана (первое значение) — процесс выхода магмы на поверхность Земли через устье выводного канала вулкана.

Извержение вулкана (второе значение) — состояние вулкана, когда магма из кратера выходит на поверхность Земли.

Понятие «извержение» используется и как единица состояния вулкана. Мы говорим: «Произошло столько-то извержений». Однако разные исследователи в понятие «извержение» вкладывают различный смысл. Одни под извержением понимают каждый отдельный взрыв или короткий выброс магмы, другие — обособленную серию взрывов, разделенных относительно небольшими интервалами времени. Третьи — только па-

роксизмальный взрыв [1, 2, 8]. Такая неопределенность объясняется как сложностью самого явления, так и отсутствием строгой терминологии. Поясним понятия «непрерывное и прерывистое извержения».

Непрерывное извержение — такое, когда магма от начала и до конца извержения поступает на поверхность Земли непрерывно или перерыв между отдельными взрывами τ_n не больше продолжительности самого взрыва τ_b ($\tau_n \leq \tau_b$). Например, извержения стромболианского или плинианского типов, излияние лавы и т. п.

Прерывистое извержение — извержение, состоящее из серии последовательных взрывов, когда перерыв между отдельными взрывами τ_n больше продолжительности самого взрыва τ_b ($\tau_n > \tau_b$), но сами взрывы

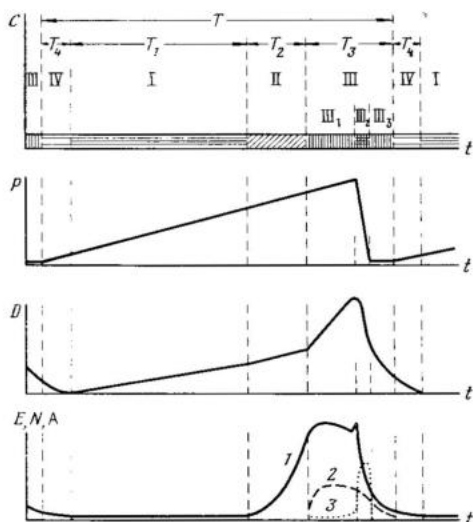


Рис. 1. Схема вулканического цикла центрального полигенного вулкана (C), характера изменения давления (P) в выводном канале, деформаций земной поверхности (D) и сейсмичности (E, N, A) вулкана. Фазы I—IV: I — покая; II — подготовки извержения; III — извержения; IV — релаксации напряжений. III₁—III₃ — этапы: III₁ — начала извержения, III₂ — его пароксизма и III₃ — затухания; T — период вулканического цикла; T₁, T₂, T₃ и T₄ — продолжительность фаз; t — текущее время; E — энергия вулканических землетрясений II и III типов (кривая 1); N — частота землетрясений IV (взрывного) типа (кривая 2); A — амплитуда вулканического дрожания (кривая 3). Все величины и времена на рисунке взяты в произвольном масштабе

составляют обособленную серию. В этом случае к одному извержению следует относить серию взрывов, в которой $\tau_n \leq \omega T_1$, где T_1 — средняя продолжительность фазы покая вулканических циклов данного вулкана, а $\omega \ll 1$ — постоянный коэффициент для данного вулкана, определяемый эмпирически. При анализе извержений Карымского вулкана коэффициент ω принимался равным 0,01. Условимся принимать для всех вулканов и всех типов извержений $\omega = 0,01$ —0,03. Примерами прерывистых извержений являются извержения вулканического типа, извержения, связанные с ростом куполов, и т. п.

Следует подчеркнуть, что границу между отдельными фазами вулканического цикла не всегда можно точно установить, однако по сейсмологическим данным (вулканическим землетрясениям I—V типов) особенности каждой фазы выделяются довольно уверенно и четко. Кроме того, надо иметь в виду, что термин «вулканический цикл» в вулканологии употребляется очень часто и имеет различное смысловое значение [2, 3, 5]. В этой работе приводится одно из значений этого термина.

Характеристики извержений

Масса магмы m . Извержение определяется как выход магмы на поверхность Земли. Поэтому его естественной количественной мерой является масса магмы m , поступившая на поверхность Земли за все время извержения. Масса магмы при извержении определяется по формуле $m = \sum(\rho V)_i$, где ρ_i и V_i — плотность и объем различных твердых, жидких и газообразных продуктов извержений (пепла, шлака, агломерата, газов, лавы и др.).

Шкала классов вулканических извержений $K_B^{T_{85}}$

$K_B^{T_{85}}$	m , кг	V , м ³	H , км	Величина извержения
4	$2,5 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^4$	1—10		
5	$2,5 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^5$	10—10 ²		
6	$2,5 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^6$	10 ² —10 ³		
7	$2,5 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^7$	10 ³ —10 ⁴	0,1	Очень слабое
8	$2,5 \cdot 10^7 - 2,5 \cdot 10^8$	10 ⁴ —10 ⁵	0,1—0,3	
9	$2,5 \cdot 10^8 - 2,5 \cdot 10^9$	10 ⁵ —10 ⁶	0,2—1	Слабое
10	$2,5 \cdot 10^9 - 2,5 \cdot 10^{10}$	10 ⁶ —10 ⁷	1—3	Умеренное
11	$2,5 \cdot 10^{10} - 2,5 \cdot 10^{11}$	10 ⁷ —10 ⁸	3—15	Небольшое
12	$2,5 \cdot 10^{11} - 2,5 \cdot 10^{12}$	10 ⁸ —10 ⁹	10—25	Большое
13	$2,5 \cdot 10^{12} - 2,5 \cdot 10^{13}$	10 ⁹ —10 ¹⁰	20—50	Очень большое
14	$2,5 \cdot 10^{13} - 2,5 \cdot 10^{14}$	10 ¹⁰ —10 ¹¹	40—80	Катастрофическое
15	$2,5 \cdot 10^{14} - 1,5 \cdot 10^{15}$	10 ¹¹ —10 ¹²	50	
16	$2,5 \cdot 10^{15} - 2,5 \cdot 10^{16}$	10 ¹² —10 ¹³	50	

Примечание. m и V — масса и объем изверженных продуктов; H — высота подъема пепловой тучи над кратером вулкана. Шкала классов вулканических (В) извержений $K_B^{T_{85}}$ составлена П. И. Токаревым (Т) в 1985 г. (85).

Класс извержения K — количественная характеристика извержения, численно равная десятичному логарифму из массы магмы m , вышедшей на поверхность Земли в течение всего извержения и выраженной в килограммах: $K = \lg(m, \text{кг})$. Шкала классов извержений приведена в табл. 1. При измерениях массы с ошибками не более 12% классы берутся с точностью до 0,1 единицы класса.

Энергия извержения E — полная энергия (тепловая, кинетическая, воздушных взрывных волн и т. п.), выносимая на поверхность Земли через устье выводного канала за все время извержения (T_3). Основная доля энергии приходится на тепловую, заключенную в магме, поэтому с достаточной точностью [4] за полную энергию извержения можно принимать тепловую энергию, которая равна массе магмы извержения, умноженной на ее теплосодержание $E = mQ$. Теплосодержание $Q = C_m(T_m - T_b) + q$. При температуре магмы $T_m = 1300$ К, теплоемкости магмы $C_m = 1,3 \cdot 10^3$ Дж/кг·град., температуре воздуха на поверхности Земли $T_b = 300$ К и теплоте кристаллизации магмы $q = 4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг. $Q = 1,7 \cdot 10^6$ Дж/кг, а энергия извержения $E = 1,7 \cdot 10^6 \cdot m$, Дж. Таким образом, полная энергия извержения является производной величиной от массы.

Масса магмы, класс и энергия извержения определяют величину извержения.

Расход магмы α при извержении численно равен отношению массы магмы извержения m к длительности фазы извержения (T_3), т. е. является средним расходом магмы за все время извержения. $\alpha = m/T_3$, кг/с. Для характеристики отдельных этапов извержения можно использовать понятия мгновенного и максимального расходов магмы.

Мощность извержения W — средняя мощность за все время извержения (T_3). $W = E/T_3 = Q \cdot \alpha = 1,7 \cdot 10^6 \cdot \alpha$ Вт. Она является производной величиной от расхода магмы при извержении.

Расход магмы и мощность извержения характеризуют интенсивность извержения.

Коэффициент эксплозивности K_0 определяется как отношение массы тефры (m_t) ко всей массе магмы при извержении (m): $K_0 = m_t/m$. При спокойном (без взрывов) излиянии лавы или выжимании купола $K_0 = 0$. По мере того как извержение приобретает все более взрывчатый характер, коэффициент K_0 растет и в пределе когда весь магматический мате-

риал во время взрыва из кратера выбрасывается в раздробленном виде, $K_a=1$. Коэффициент эксплозивности отражает взрывчатость (характер) извержения.

Таким образом, основными характеристиками следует считать массу (m), расход магмы (α) и коэффициент эксплозивности (K_a), так как они в достаточной мере определяют величину, интенсивность и характер извержения, причем имеют конкретный и ясный физический смысл. При исследовании извержений основные характеристики могут дополняться и другими количественными и качественными характеристиками, такими, как высота подъема пепловой тучи; скорость истечения из кратера газоагломератовой струи; площадь, мощность и дальность отложения различного твердого материала; скорость движения лавового потока; энергия и мощность вулканического дрожания и взрывных вулканических землетрясений; энергия воздушных волн, вызванных взрывами в кратере; кинетическая энергия взрывов; мощность эксплозивной деятельности вулканов; тип извержения; описание характера извержения и другие.

Характеристики вулканической активности

Понятие «вулканическая активность» получило в вулканологии широкое распространение, однако оно точно не определено. Обычно, под вулканической активностью понимается любое проявление деятельности вулкана, отличное от состояния полного покоя. С другой стороны, этим же термином обозначается частота и интенсивность извержений, когда говорят, что один вулкан активнее другого. В настоящее время термины «вулканическая активность», «активность вулкана», «активность вулканов» настолько вошли в обиход, что заменить их другими терминами почти невозможно, да и делать это не имеет особого смысла. Необходимо только по мере возможности придать им более точное определение и дать количественное выражение.

Активность вулкана характеризуется частотой его извержений и их мощностью. Остановимся на рассмотрении некоторых количественных характеристик активности вулканов.

Расход вулкана α . Средний расход магмы за длительный период, включающий n вулканических циклов $\left(\alpha = \sum_1^n m_i / \sum_1^n T_i\right)$, $i=1, 2, \dots, n$.

Он является наиболее общей характеристикой мощности вулкана в советской вулканологии (этот термин систематически употребляется с 1974 г. [4]). Однако расход вулкана не дает полного представления об активности вулкана, так как извержения у различных вулканов имеют различную продолжительность и силу. У разных вулканов расход α различен и варьирует в пределах от 25 до 2900 кг/с, а, возможно, и в больших пределах [4].

Коэффициент активности вулкана K_a — отношение длительности фазы извержения T_3 к периоду вулканического цикла T . $K_a=T_3/T$ обычно определяется как средняя величина нескольких (n) вулканических циклов $\left(K_a = \sum_1^n T_{3i} / \sum_1^n T_i\right)$. Он показывает, какую долю времени вулкан

находится в состоянии извержения. По величине K_a можно судить о характере извержений. У вулканов с открытым жерлом извержения более слабые, но частые и коэффициент K_a велик, а у вулканов с закрытым жерлом — мал.

Частота извержений — количество всех извержений данного вулкана или района в единицу времени. За единицу времени принимается 1 год. Однако в каждом отдельном случае могут быть приняты и другие интер-

валы времени, например 100 или 1000 лет, что должно быть специально оговорено.

Чтобы иметь возможность сравнивать активность различных вулканов, необходимо их частоту рассматривать для извержений начиная с какого-то одного уровня, одного класса K_0 , для которого каталоги являются полными, и обозначать такие величины индексом у буквы N . Например, частота $N_{K \geq 9}$ означает, что при ее определении были использованы только извержения класса $K \geq 9$.

Наиболее полное представление об активности вулканов дает частота извержений, определенная для каждого класса извержений отдельно. Обозначим ее через N_K , где индекс K обозначает класс извержения. Например, N_{10} означает число извержений класса $K=10$ данного вулкана, происшедших за один год.

Частота извержений N может относиться к одному вулкану, к группе вулканов, к отдельному району или целиком к земному шару. Это оговаривается в каждом конкретном случае.

Период вулканического цикла T . Понятие среднего периода вулканического цикла $T=1/N$, так же как и частоты извержений N , может использоваться при анализе активности вулканов. При этом, как и при рассмотрении частоты извержений, можно рассматривать или все извержения, или извержения только определенных классов.

Годы извержений. Извержения вулканов происходят сравнительно редко, и при исследовании их активности приходится брать большие интервалы времени. Однако полнота каталогов и количественных характеристик извержений в различное время различны. Поэтому иногда вместо извержений удобнее и проще брать годы, в которые происходили извержения вулкана, и каждый такой год считать одним извержением. При этом могут возникать некоторые искажения количества извержений, так как одно извержение может продолжаться несколько лет подряд и вместо одного будет взято несколько извержений. С другой стороны, иногда в один год происходит не одно, а несколько извержений. В этом случае число «извержений» будет занижено. Однако такие случаи редки, и в среднем число лет, в которые происходили извержения, будет близко к числу извержений за это время. Поэтому при общем исследовании активности вулканов можно пользоваться и тем и другим способом. Но при детальном исследовании активности вулканов необходимо рассчитывать коэффициент активности K_a .

Полнота каталогов вулканических извержений в различные времена различна, но общие правила таковы: 1) чем дальше отстоит время извержения от настоящего времени, тем меньше полнота каталога; 2) чем больше извержения, тем полнее они представлены в каталогах; 3) абсолютно полными (без пропусков) можно считать только каталоги, составленные по данным обсерваторий, ведущих наблюдения за состоянием определенного вулкана. На полноту каталогов влияет и характер деятельности вулкана. У одних вулканов извержения бывают очень слабыми, но происходят часто, а у других — наоборот. В первом случае вероятность того, что извержение не будет замечено, больше, а во втором — меньше. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать активность различных вулканов, необходимо их частоту рассматривать для извержений начиная с какого-то уровня, одного какого-то класса K_0 , для которого каталоги являются полными.

Распределение извержений вулканов по классам К

К	Район			К	Район		
	Весь мир		Камчатка и Курильские острова		Весь мир		Камчатка и Курильские острова
	N_{K1}	N_{K2}			N_{K1}	N_{K2}	
7	—	10	—	15	1	0	0
8	443	13	3	16	0	0	0
9	361	14	29	7—16	4 815	275	180
10	3108	40	113				
11	720	118	26	τ, годы	10 000	3500	80
12	131	70	7	a	0,66	0,68	0,58
13	35	15	2	b	10,08	10,06	7,85
14	16	3	0				

Примечание. Число извержений вулканов: N_{K1} — мира, по каталогу Т. Симкина и др. [8]; N_{K2} — мира, по каталогу И. И. Гущенко [2]; N_{K3} — Камчатки и Курильских островов за 1901—1980 гг. τ — интервал времени, за который взяты данные; a и b — коэффициенты уравнения (1).

Повторяемость извержений

В настоящее время в мире накоплен значительный материал по количественным характеристикам извержений вулканов, который позволяет определить классы извержений и рассмотреть достаточно обоснованно вопрос о повторяемости извержений, т. е. зависимости числа извержений N_K от величины их классов К.

Для анализа нами были выбраны три группы извержений и для них определены классы извержений. Первая группа — извержения мира за последние 10 тыс. лет, взятые из каталога извержений Т. Симкина и др. [8]. Классы извержений определены по табл. 1. Вторая группа — извержения мира за последние 3,5 тыс. лет, взятые из каталога извержений И. И. Гущенко [2]. Классы извержений определены по формуле $K = \lg m$, где масса изверженного материала выражена в килограммах. Третья группа — извержения вулканов Камчатки и Курильских островов за 1901—1980 гг., взятые автором из различных каталогов и публикаций. Все данные об извержениях приведены в табл. 2.

При нанесении данных табл. 2 на график было установлено, что зависимость $N(K)$ при $K \geq 10$ имеет линейную форму вида

$$\lg N_K = aK + b, \quad (1)$$

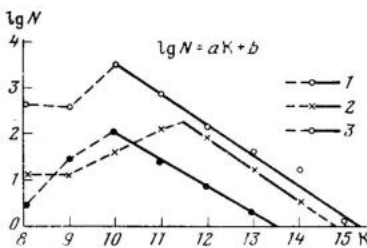


Рис. 2. Зависимость числа извержений N от класса извержения K . 1 — извержения вулканов мира за 10 тыс. лет по данным [8], $a = -0,66$; 2 — извержения вулканов мира за 3,5 тыс. лет по данным [2], $a = -0,68$; 3 — извержения вулканов Камчатки и Курильских островов за 1901—1980 гг., $a = -0,58$.

где N_K — число извержений класса K , a и b — постоянные коэффициенты. Коэффициенты a и b , определенные методом наименьших квадратов для всех трех групп извержений, приведены в нижней части табл. 2.

Зависимость $\lg N = f(K)$ для всех трех групп извержений (см. табл. 2) представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, во всех трех случаях в области больших значений K зависимость линейная. Коэффициенты уравнения a и b в первых двух случаях имеют близкие значения, и это указывает

на то, что оба каталога имеют одинаковую полноту для извержений $K \geq 12$. Наклон графика повторяемости для извержений вулканов Камчатки и Курильских островов несколько отличается от первых двух. Возможно, это связано с тем, что взят очень короткий период наблюдений.

Линейность графика повторяемости при больших извержениях, по-видимому, является общей закономерностью в деятельности вулканов Земли, так как она четко выражена и для извержений всего мира, и для извержений отдельного региона. Если это так, то полученная зависимость является важным результатом. Она может быть использована при анализе вулканической активности как отдельных вулканов, так и различных регионов.

Например, на основании графиков (см. рис. 2) можно заключить, что данные о массе изверженного материала в каталоге И. И. Гущенко [2] являются достаточно полными только для извержений класса $K \geq 12$. Спад графиков повторяемости на рис. 2 при $K < 10$ может быть связан как с существованием естественного нижнего предела величины извержений, так и с неполнотой данных. При детальном анализе извержений отдельных вулканов или извержений вулканических районов по величине коэффициента a в уравнении 1, по-видимому, можно будет выявить некоторые особенности деятельности вулканов. Зная величину коэффициентов уравнения 1, по известной частоте некоторых классов (N_K) извержений можно определить частоту извержений других классов (N_{K_0}), если она неизвестна:

$$N_{K_0} = N_K \cdot 10^{a(K-K_0)} \quad (2)$$

Более точное значение N_{K_0} получится, если его определить как среднюю величину:

$$N_{K_0} = \frac{1}{n} \sum_1^n N_{K_i} \cdot 10^{a(K_i-K_0)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Возможны и другие варианты использования коэффициентов уравнения 1 при анализе деятельности вулканов.

Заключение

В статье уточнены некоторые основные понятия, используемые в вулканологии, дано подробное описание вулканического цикла и характеристик его отдельных фаз.

Величина, интенсивность и характер извержения определяются тремя основными величинами: классом извержения, расходом магмы и коэффициентом эксплозивности. Полученная линейная зависимость между логарифмом частот и величиной классов извержений может быть использована при анализе активности вулканов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влодавец В. И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
2. Гущенко И. И. Извержения вулканов Мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
3. Гущенко И. И. Цикличность извержений вулканов Мира // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 27—48.
4. Токарев П. И. Некоторые закономерности вулканического процесса // Магмообразование и его отражение в вулканическом процессе. М.: Наука, 1977. С. 25—40.

5. Токарев П. И. Долгосрочный прогноз извержений вулканов//Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 27—90.
6. Токарев П. И. Предвестники вулканических извержений//Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108—119.
7. Hedervari P. On the energy and magnitude of volcanic eruptions//Bull. Volcanol. 1963. V. 25. N 2. P. 374—385.
8. Simkin T., Siebert L., McClell L., Bridge D., Newhell C., Latter I. Volcanoes of the World//Smith. Inst., Hutchinson Ross Publ. Comp. 1981. 240 p.
9. Tsuya H. Geological and petrological studies of volcano Fuji. 5. On the 1707 eruption of volcano Fuji//Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. 1955. V. 33. P. 341—384.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР

Поступила в редакцию
19.V.1986

УДК 551.21

ЗОБИН В. М., ФЕДЯКОВ М. В.

**ВЫЕЗДНАЯ СЕССИЯ МСССС НА КАМЧАТКЕ,
ноябрь, 1986 г.**

Выездная сессия Междуведомственного Совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при президиуме АН СССР (МСССС) проходила в г. Петропавловске-Камчатском с 17 по 20 ноября 1986 г. Сессия была посвящена 25-летию детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах. В работе сессии приняли участие около 300 человек, представляющие 49 организаций Советского Союза, ведущих исследования по сейсмологии и сейсмостойкому строительству. На пленарных заседаниях было заслушано 44 научных доклада и рассмотрено 65 стендовых докладов. Доклады были сгруппированы по четырем основным проблемам: 25 лет детальных сейсмологических исследований на Камчатке; сейсмичность, глубинное строение, геодинамика и механизм глубинных процессов; физика очага и прогноз сейсмической опасности; сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. Издан сборник объемом 15 печатных листов, содержащий тезисы 183 докладов.

Итоги 25 лет сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах были подведены в девяти докладах сотрудников Института вулканологии (ИВ) ДВО АН СССР, Института физики Земли (ИФЗ) АН СССР и геодезистов Хабаровского предприятия. Чл.-корр. АН СССР С. А. Федотов (ИВ) рассказал об истории становления сейсмологических исследований в регионе, обобщил данные о сейсмичности Камчатки и Командорских островов за четверть века (1961—1986 гг.). Истории развития и нынешнему состоянию сейсмологической сети наблюдений в регионе был посвящен доклад, который от группы авторов сделал Е. И. Гордеев (ИВ). О специфике проявлений шести сильных камчатских землетрясений с магнитудой 5,9—7,8, отмеченных за последние 25 лет, рассказал В. М. Зобин; доклад был подготовлен совместно с С. А. Федотовым и Е. И. Гордеевым (ИВ). П. И. Токарев (ИВ) доложил результаты разработки метода прогноза вулканических извержений по сейсмическим данным. Тема детального исследования вулканических землетрясений Камчатки была развита в последующем докладе В. И. Горельчик, В. М. Зобина и П. И. Токарева (ИВ). Доклад М. А. Магуськина (ИВ) с группой соавторов (ИВ, ИФЗ и Хабаровское предприятие) был посвящен геодезическим измерениям деформаций земной поверхности сейсмоактивных зон Камчатки. С интересом было выслушано сообщение А. В. Викулина (ИВ) и Л. Г. Синельниковой (ИФЗ) об истории деятельности сейсмической станции Петропавловск, 70-летие которой было отмечено недавно.

При обсуждении докладов сессия отметила фундаментальность результатов в области изучения сейсмичности, сейсмического режима сейсмофокальной зоны Камчатки, вулканических землетрясений; развития методика долгосрочного сейсмического прогноза места и времени сильных ($M \geq 7,7$) землетрясений, прошедшая успешное апробирование, на-

чая с 1965 г.; развита и успешно применена методика прогноза вулканических извержений по сейсмическим данным; проведено общее сейсмическое районирование Камчатки и Командорских островов и микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского; подробно изучены проявления шести сильных ($M \geq 6,9$) землетрясений рассматриваемого периода. Ведутся интенсивные работы по развитию телеметрических кустов сейсмических станций, разработке и эксплуатации автоматических сейсмических станций. Создается Камчатская геофизическая станция ИФЗ АН СССР. Образованы камчатские лаборатории сейсмостойкого строительства и сейсмостойких конструкций и оснований ДальНИИСа Госстроя СССР.

14 докладов были посвящены различным аспектам физики очага землетрясений и прогноза сейсмической опасности. Среди них были доклады А. А. Гусева и В. М. Павлова (ИВ), И. Е. Волкова (ИМГиГ), содержащие теоретические расчеты характеристик сейсмического очага и итоги экспериментальных работ по динамике очагов землетрясений (Л. М. Плотникова, ИС АН УзССР; Б. Г. Пустовитенко, А. Г. Каменобродского, ИГ АН УССР). В ряде докладов рассматривались исследования предвестников сильных землетрясений по аномалиям электрических полей при наблюдениях со спутников (В. М. Чмырев, Н. В. Исаев, С. В. Биличенко и др., ИЗМИРАН; В. И. Ларкина, В. М. Мигулин, О. А. Молчанов, ИЗМИРАН) и на наблюдательных пунктах в сейсмоактивных зонах (Г. А. Соболев, А. В. Пономарев, А. А. Хромов и др., ИФЗ); исследование вариаций геофизических (Г. П. Декин, А. П. Нетесов, Л. М. Смирнов и др., ПГО Камчатгеология), гидрогеодинамических (А. И. Иващенко, Г. Г. Якушко, Л. И. Басарукина, ИМГиГ) и геодезических (С. А. Федотов, В. Ф. Бахтияров, Н. А. Жаринов и др., ИВ) параметров, наблюдаемых близ Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны.

Проблемы развития исследований и некоторые результаты работ по долгосрочному сейсмическому прогнозу обсуждались в докладах С. А. Федотова (ИВ) и С. Д. Чернышева (ИФЗ); А. Г. Прозорова (ИФЗ). Интересные результаты исследования суточной ритмичности сильнейших землетрясений в основных сейсмоактивных регионах СССР были доложены В. А. Широковым (ИВ). В докладе сотрудников ИФЗ АН СССР Т. В. Голубевой, В. Ф. Писаренко и М. Г. Шнирмана рассматривались иерархические свойства сейсмического процесса. Обзор сейсмологических исследований, проводимых в целях оперативного прогноза цунами, был сделан А. А. Поплавским (ИМГиГ).

По разделу «Сейсмичность, глубинное строение, геодинамика и механизм глубинных процессов» было заслушано пять докладов. Р. З. Тараканов (ИМГиГ) проанализировал специфические черты строения сейсмофокальных зон северо-западной части Тихого океана. Теоретический расчет геомеханического эффекта сейсмофокальной зоны как наклонного разлома в полуплоскости проведен в докладе С. С. Демина (ИФЗ) и С. Е. Жаринова (ИВ). В остальных докладах обсуждались особенности глубинного строения и проявлений сейсмичности Курило-Охотского региона (Т. С. Злобин, ИМГиГ; А. Н. Бойчук, Н. А. Миталева, А. О. Бобков, ИМГиГ) и Алеутских островов (А. В. Викулин, ИВ).

Большое внимание на сессии было уделено вопросам теории и практики сейсмостойкого строительства и инженерной сейсмологии. Заслушано 14 докладов и сообщений.

Доклад Т. Ж. Жунусова (КазпромстройНИИпроект) был посвящен современным задачам сейсмостойкости зданий и сооружений. Автор подчеркнул необходимость проведения более широких комплексных экспериментальных исследований на натуральных объектах, получение и уточнение реальных динамических параметров зданий и сооружений, реальных сейсмических нагрузок для расчета сейсмостойкости конструкций.

Современное состояние и пути развития расчетов сейсмостойкости оснований и фундаментов были освещены в докладе В. И. Ильичева, Л. Р. Ставнищера (НИИОСП им. Герсеванова Госстроя СССР).

Специалисты института «Камчатсгражданпроект» В. Н. Дроздюк, Л. П. Гавронский, Ю. М. Хазанов посвятили свои сообщения инженерному анализу последствий сильных землетрясений (Газли, 1976 г., 1984 г.; Кайракум, 1985 г.; Кишинев, 1986 г.), современным требованиям к качеству проектирования и расчета зданий в особо опасных сейсмических районах, принципиальности авторского надзора.

Исследования сейсмостойкости кирпичных зданий, возводимых в условиях сурового климата, были отражены в докладе Э. В. Демина и А. Н. Кульгавого (Восточно-Сибирский технологический институт). Ими совместно с ЦНИИСК им. Кучеренко экспериментально установлено, что применение полимерных добавок ПВА, СПС-65ГП «Б» и ВХВД-65 «ПЦ» способствует более прочному сцеплению кладки со всеми видами кирпича, включая силикатный, и ведет к повышению сейсмостойкости конструкций.

В сообщении В. И. Хорькова, Б. И. Кауфмана (ВНИИГ им. Веденеева Минэнерго СССР) отмечалась необходимость серьезной корректировки и дальнейшего развития существующей нормативной базы по проектированию и строительству различных инженерных объектов в сейсмоопасных районах — в первую очередь энергетических комплексов (ГЭС, АЭС, ТЭС, ПЭС). Подчеркивалось, что реализация поставленных задач в кратчайшие сроки может быть осуществлена в Камчатском регионе, уникальном по своим сеймотектоническим, вулканическим, климатическим и инженерно-геологическим условиям.

Этапам развития инженерно-сейсмометрической службы (ИСС) на зданиях и сооружениях г. Петропавловска-Камчатского был посвящен доклад М. В. Федякова (ДальНИИС Госстроя СССР). Отмечалось, что ИСС города функционируют с 1969 г. В настоящее время сеть ИСС состоит из десяти станций и примерно 400 каналов регистрации.

В докладе С. Н. Федяковой (ДальНИИС Госстроя СССР) была дана оценка параметров входного воздействия и реакции сооружений для расчета сейсмостойкости конструкций.

О некоторых экономических и социальных аспектах проблемы сейсмического риска, о расчете сейсмостойкости системы «сооружение — грунт» в условиях частой повторяемости землетрясений Камчатки сообщил в своем докладе М. А. Клячко (ДальНИИС Госстроя СССР). Повышению сейсмостойкости зданий путем устройства подвалов был посвящен доклад Л. Л. Егоровой (ПТИ, Фрунзе).

Итоги деятельности рабочей группы по сейсмостойкому строительству Дальневосточной региональной секции доложили Б. А. Пышкин и А. Ф. Штанько (ДальНИИС, ДальморНИИпроект).

На сессии были рассмотрены вопросы развития сейсмологических исследований в ряде регионов Дальнего Востока. Отмечен ряд положительных моментов в проведении этих исследований в 1985—1986 гг.

В ИМГиГ ДВНЦ АН СССР завершено создание универсального пакета прикладных программ, автоматизирующего первичную обработку цифровых сейсмограмм близких землетрясений; создана автоматизированная система моделирования кинематики цунами применительно к реальным условиям Дальневосточного побережья СССР. Впервые в СССР начат выпуск оперативных препринтов информационных сообщений о сильнейших землетрясениях региона. В 1986 г. осуществлено два таких выпуска: о Шикотанском землетрясении 16.IV 1986 г. и Итурупском землетрясении 21.V.1986 г.

В СВКНИИ ДВНЦ АН СССР создана первая очередь банка данных на ЭВМ Искра-226, включающая сведения о параметрах сейсмической аппаратуры, эпицентрии и ряд первичных программ. Выполнены комп-

лексные исследования микросейсмического фона, даны рекомендации по выбору амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для ряда сейсмометрических каналов.

В Институте вулканологии ДВО АН СССР создана база сейсмологических данных на основе СУБД «Квант» по наблюдениям за локальными сетями автономных сейсмических станций.

Сессия приняла развернутое решение, в котором наметила пути дальнейшего развития сейсмологических исследований на Дальнем Востоке.

По завершению выездной сессии МСССС в течение двух дней была проведена VI научная сессия Дальневосточной секции МСССС, посвященная в основном вопросам методики сейсмологических исследований.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР
ДальНИИС Госстроя СССР

Поступила в редакцию
13.I.1987

ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА И ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Вулканология и сейсмология» рассчитан на вулканологов, сейсмологов, геологов, геофизиков, геохимиков и читателей других специальностей, интересующихся проблемами вулканизма, сейсмичности и глубинных процессов вулканических областей.

В журнале освещаются следующие вопросы:

современная наземная и подводная вулканическая деятельность, продукты вулканических извержений, строение вулканов и их «корней», сейсмические и другие наблюдения на активных вулканах, предсказание вулканических извержений;

неоген-четвертичный вулканизм, развитие вулканических центров, эволюция вулканизма в истории Земли;

петрология изверженных пород, происхождение магм;

геохимия вулканических, поствулканических процессов и связанное с ними минерало- и рудообразование;

геотермия и гидротермальные системы вулканических областей;

сейсмологические наблюдения, сейсмичность, физика землетрясений, современные движения, глубинное строение и геодинамика зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану и других вулканических областей; сейсмический прогноз;

механизм глубинной магматической деятельности и вулканических извержений.

В журнале помещаются статьи, содержащие законченные, еще неопубликованные результаты теоретических и экспериментальных работ, обзорные статьи, сообщения по названной тематике, рецензии, а также хроника событий.

Редакция просит авторов журнала следовать изложенным ниже правилам.

1. Статьи должны сопровождаться письмом (разрешением на опубликование) руководителя учреждения и другой соответствующей документацией. В конце статьи указывается название учреждения, откуда она поступила, и ставится подпись автора. Авторы должны также письменно сообщить свой почтовый адрес и телефон.

2. Объем статьи не должен превышать 24 машинописных страниц (включая таблицы и литературу), сообщения — 10 стр., хроника и рецензии — 5 стр.

3. Статьи представляются в двух экземплярах. Текст печатается на машинке через два интервала на одной стороне листа по 30 строк на странице, по 60—65 знаков в строке, считая знаки препинания и пробелы, с полями с левой стороны 3 см.

4. К статье прикладываются в двух экземплярах аннотации на русском и английском языках объемом не более 1/2 стр. В начале аннотации указываются индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов в конце аннотации — количество рисунков, таблиц, библиографических названий.

5. В тексте статей не допускается сокращение (кроме общеупотребительных); сокращенные названия поясняются при первом упоминании; все местные географические названия должны быть проверены. Применяются международная система единиц измерений СИ или система GGS (в пределах статьи должна быть выдержана одна из них).

6. Таблицы печатаются на отдельных страницах через два интервала, они не должны дублировать текст. Все пояснения и размерность величин даются в боковике и «шапке» таблицы.

7. Математические и химические формулы отчетливо вписываются черными чернилами и размечаются авторами. Формулы, имеющие ссылки в тексте, выключаются в красную строку и нумеруются. Прописные буквы подчеркиваются карандашом двумя черточками снизу (C), а строчные — сверху (c). Подстрочные и надстрочные индексы

отмечают карандашом дугами сверху и снизу (k^n , r_n). Греческие буквы подчеркивают снизу красным карандашом, векторные величины — синим цветным (без стрелки над буквой), на поля выносятся математические знаки ($>$, Σ и др.). Следует четко обозначать заглавные и строчные буквы латинского и греческого алфавита, имеющие сходные начертания: C, c; K, k; P, p; O, o; S, s; U, u; V, v; W, w; Ψ, ψ и т. д.; четко писать и размечать буквы: h и n, g и q, l и e, I и J, римскую I и арабскую 1. Математические символы типа sin, lim, log, max, min, а также химические элементы отмечают квадратной скобкой снизу (например, log 1 =; Fe).

8. Рисунки прилагаются в отдельном конверте в двух экземплярах (фотографии в трех экз. на глянцевого бумажке). Количество рисунков не должно превышать 6 на авторский лист. Штриховые рисунки присылаются в виде чертежей, выполненных черной тушью на белой бумаге, или их фотокопий на матовой бумаге в формате, обеспечивающем передачу всех деталей. Рисунки должны иметь все необходимые обозначения, но содержать минимальное количество надписей; большая их часть дается в подписи к рисунку. На полях в тексте против первой ссылки на рисунок ставится в рамке номер рисунка. На обороте рисунка карандашом указываются фамилии авторов, название статьи и номер рисунка.

9. Подписи к рисункам печатаются на отдельной странице через два интервала в двух экземплярах.

10. Цитируемая литература приводится в алфавитном порядке в виде пронумерованного списка в конце статьи, вначале русские работы, затем иностранные. Для книг

указываются фамилии, инициалы авторов, название книги, место издания, издательство, год, количество страниц в книге. Для статей в сборниках — фамилия, инициалы автора, название статьи, название сборника, место издания, издательство, год, страницы статьи. Для статей в журналах — фамилия, инициалы, название статьи, название журнала, год, том, номер или выпуск, страницы статьи. При ссылках на литературу в тексте приводится в квадратных скобках номер данной работы. Иностранные фамилии в тексте пишутся в русской транскрипции. Все латинские названия печатаются на машинке. Ссылки на неопубликованные работы допускаются в подстрочных примечаниях.

11. Корректур статей авторам для просмотра не высылаются. В связи с этим редакция просит авторов тщательно готовить машинописный текст статей и иллюстрации и подписывать статьи после их научного редактирования.

12. Редакция сохраняет за собой право сокращать статьи и подвергать их, если это необходимо, литературной правке.

13. В случае возвращения автору статьи для дальнейшей доработки дата поступления считается с момента получения редакцией окончательного текста.

14. Редакция выдает авторам бесплатно 25 оттисков статьи.

Статьи просим высылать по адресу: 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Институт вулканологии, Редакция журнала «Вулканология и сейсмология».

Адрес редакции

683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9,

Институт вулканологии, тел. 3-90-12

103062, Москва, Подсосенский пер., 21, тел. 227-01-45

Зав. редакцией *Е. В. Каменская*

Технический редактор *И. В. Карандашова*

Сдано в набор 29.09.87 Подписано к печати 24.11.87 Т-18654 Формат бумаги 70×108^{1/16}
Высокая печать Усл. печ. л. 11,2 Усл. кр.-отт. 15,5 тыс. Уч.-изд. л. 12,8 Бум. л. 4,0
Тираж 1355 экз. Зак. 4311

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»,
103717, ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука», 121099, Москва, Шубинский пер., 6

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НАУКА»

готовятся к печати:

АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН. 10 л. 1 р. 50 к.

Книга подводит итог исследованиям, выполненным коллективом опытных специалистов в области космической геологии, по изучению сейсмоактивных поясов и зон с широким использованием материалов аэро- и космических съемок. Определены особенности применения аэро-космической информации в геологии, на конкретных примерах различных регионов мира показана методика изучения активных зон и оценки их сейсмической опасности. Книга может служить методическим пособием при проведении сеймотектонических работ.

Издание рассчитано на специалистов в области дистанционного зондирования, геологов, геофизиков, геоморфологов.

Мизин В. И. ПОЗДНЕПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ВУЛКАНИЗМ СЕВЕРА УРАЛА. 12 л. 1 р. 90 к.

В книге обобщаются данные по древнему вулканизму севера Урала. Даются детальные геологическая, петрографическая и петрохимическая характеристики вулканических пород. Разбираются вопросы петрогенеза. Приведены сведения о рудоносности вулканических формаций.

Работа предназначена для геологов, занимающихся изучением древних вулканитов и рудоносности.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов «Книга—почтой» «Академкнига»:

480091 Алма-Ата, 91, ул. Фурманова, 91/97; 370001 Баку, Коммунистическая ул., 51; 690088 Владивосток, Океанский проспект, 140; 320093 Днепрпетровск, проспект Ю. Гагарина, 24; 734001 Душанбе, проспект Ленина, 95; 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289; 420043 Казань, ул. Достоевского, 53; 252030 Киев, ул. Пирогова, 4; 277012 Кишинев, проспект Ленина, 148; 343900 Краматорск, Донецкой области, ул. Марата, 1; 443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2; 197345 Ленинград, Петрозаводская ул., 7; 220012 Минск, Ленинский проспект, 72; 117192 Москва, Мичуринский проспект, 12; 630090 Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22; 142292 Пушкино, Московской обл., МР, «В», 1; 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137; 700185 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6; 450059 Уфа, 59, ул. Р. Зорге, 10; 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42; 310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87.

К 25-ЛЕТИЮ ДЕТАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАМЧАТКЕ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВАХ, XI.1961—X.1986: ИСТОРИЯ, РАЗВИТИЕ И ЗАДАЧИ. Федотов С. А. «Вулканология и сейсмология», 1987, № 6.

Наблюдения за землетрясениями Камчатки ведутся 250 лет: с X.1737 г.—66% этого времени, 1737—1899 гг. занимает период макросейсмических наблюдений—24% времени, 1899—1961 гг. приходится на период, когда наблюдения проводились преимущественно на удаленных станциях. Последние 10% времени, 1961—1987 гг. действует камчатская региональная сеть сейсмостанций, открытая I.XI.1961 г., и проводятся детальные сейсмологические исследования, в ходе которых получено большинство имеющихся сведений. Описываются задачи, условия и организация детальных сейсмологических исследований на Камчатке, этапы их развития, называются фундаментальные научные и важные научно-прикладные результаты, обсуждаются перспективы. Среди главных итогов называются такие: подробные сведения о размещении очагов землетрясений Камчатки и области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг; однородный каталог 40 000 землетрясений за XI.1961—1986 гг. для этого региона, где происходит 1/3 землетрясений СССР; методика долгосрочного сейсмического прогноза и др.

Рис. 1, библиограф. 19 назв.

РАЗВИТИЕ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ. Федотов С. А., Феофилактов В. Д., Гордеев Е. И., Гаврилов В. А., Чебров В. Н. «Вулканология и сейсмология», 1987, № 6.

Детальные сейсмометрические наблюдения на Камчатке были начаты в январе 1961 г. До этого времени наблюдения за землетрясениями в районе Камчатки и Командорских островов проводились отдельными удаленными сейсмостанциями, а в 1947—1960 гг.—с привлечением также нескольких разрозненных сейсмических станций на Камчатке. Организация в 1961 г. Камчатской региональной сети сейсмических станций позволила проводить надежную регистрацию землетрясений, начиная с энергетического класса $K_{S_{1,2}}^{Фог} \geq 10$ ($M \geq 3,6$) по всему региону и $K_{S_{1,2}}^{Фог} \geq 9$ ($M > 2,2$) на Восточной Камчатке. За 25 лет наблюдений (к 1987 г.) общее число землетрясений, вошедших в единый каталог, составило более 40 тыс.

Совместно с развитием региональных сейсмических станций на Камчатке создавалась сеть станций для регистрации сильных землетрясений, которая к настоящему времени насчитывает 27 пунктов, оснащенных аппаратурой, позволяющей регистрировать события с проявлением от 3 баллов и выше. С 1971 г. начаты и успешно развиваются современные методы наблюдений с применением радиотелеметрических систем сбора информации, а также автономных сейсмических станций, как наземных, так и донных. В системах обработки информации для таких наблюдений используются средства автоматизации и вычислительная техника. На основании сейсмологических данных, накопленных за 25 лет детальных сейсмометрических наблюдений, получен ряд важных результатов, таких, как пространственное положение сейсмофокальной зоны, сейсмическое районирование Камчатки и микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского, определение закономерностей сейсмического цикла сильных землетрясений и на основании этого разработка методики долгосрочного сейсмического прогноза. Детально изучены форшок-афтершоковые последовательности всех сильнейших землетрясений ($M \geq 7$) с 1961 по 1986 г.

В настоящее время комплексные сейсмометрические наблюдения проводятся с постоянным ростом как количественного объема наблюдательного материала, так и его качественного уровня.

Рис. 6, табл. 3, библиограф. назв. 22.

СЕЙСМИЧНОСТЬ КАМЧАТКИ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ ПО ДАННЫМ ДЕТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. Федотов С. А., Шумилина Л. С., Чернышева Г. В. «Вулканология и сейсмология», 1987, № 6.

Рассматривается сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных сейсмологических исследований в 1962—1983 гг. Определено более 40 000 гипоцентров. Исходные данные представительны по полноте и про-

должительности. Размещение гипоцентров показано на послонных картах эпицентров для глубин 0—50, 50—100, 101—150, 151—200 и 201—250 км и на вертикальных разрезах, ориентированных вдоль и вкост Курило-Камчатской и Алеутской дуг. Подавляющее большинство очагов землетрясений лежит в сейсмофокальном слое (зоне Вадати—Заварицкого—Беньоффа). Кроме него выделяется сейсмичность глубоководного желоба, а на самой Камчатке разломов, обрамляющих депрессию долины р. Камчатки, пояса вулканов и поперечной структуры, существующей в месте параллельного изгиба желоба, сейсмофокального слоя и пояса вулканов.

Представлены графики повторяемости землетрясений, карты сейсмической активности A_{10} и выделившейся сейсмической энергии D , кумулятивные графики сейсмической энергии.

В 1962—1983 гг. происходило обычное среднее для Камчатки число слабых землетрясений, но было сравнительно мало землетрясений с $M \geq 6$, и накопилась сейсмическая энергия, достаточная для нескольких землетрясений с $M \sim 8$.

Среднее количество энергии, выделившееся в 1899—1986 гг. на единицу длины дуги на Камчатке и на Курильских островах, одинаково с точностью до нескольких процентов, что свидетельствует об одинаковой интенсивности сейсмических процессов вдоль всей Курило-Камчатской островной дуги.

Обсуждаются данные о связи сейсмичности с вулканизмом, тектоникой. Намечаются дальнейшие задачи.

Рис. 13, табл. 5, библи. 53 назв.

УДК 551.21.032

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНОВ. Горельчик В. И., Зобин В. М., Токарев П. И. «Вулканология и сейсмология», 1987, № 6.

Рассматриваются общие характеристики проявления сейсмичности в районе активных вулканов. Приводится классификация вулканических землетрясений и их роев. Отмечается определяющая роль эруптивных трещин в характере проявления сейсмической активности, предвещающей побочные и центральные извержения. Описываются закономерности распределения очагов вулканических землетрясений во времени и пространстве, приводятся примеры сейсмического режима вулканических районов.

Рис. 8, библи. 32 назв.

УДК 550.34.06

МЕХАНИЗМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КАМЧАТСКО-КОМАНДОРСКОГО РЕГИОНА В 1964—1982 ГГ. Зобин В. М. «Вулканология и сейсмология», 1987, № 6.

Проведено исследование системы напряжений, действующих в пределах литосферы (0—59 км) и верхних слоев астеносферы (60—150 км) по данным определений механизма очага землетрясений энергетического класса выше 12,5 ($M > 5,3$) за 1964—1982 гг. Проведено районирование по типам подвижек в очагах землетрясений и доминирующей системе напряжений. Для литосферного слоя выделено четыре однородно-напряженных участка, для астеносферного — два. На основе индивидуальных определений механизма очага, а также осредненных по зонам, и региональных корреляционных зависимостей сейсмического момента от энергетического класса землетрясений построены схемы компонент тензора скорости сейсмотектонического деформирования (СТД) региона раздельно для литосферного и астеносферного слоев. Показано, что по характеру глубинного распределения типов подвижек и действующих напряжений в очагах землетрясений камчатский участок Курило-Камчатской зоны может рассматриваться как двойная фокальная зона.

Рис. 7, табл. 3, библи. 24 назв.

УДК 550.343.6

20 ЛЕТ ДОЛГОСРОЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ: ДОСТОВЕРНОСТЬ В 1981—1985 ГГ., В ЦЕЛОМ ЗА 1965—1985. ГГ. И ПРОГНОЗ НА 1986—1990 ГГ. Федотов С. А., Чернышев С. Д. «Вулканология и сейсмология», 1987, № 6.

Дается оценка 20-летнего опыта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги по методике С. А. Федотова [1965, 1968] в 1965—1985 гг. Показано, что были вполне успешными прогноз места следующих зем-

летрясений с $M \geq 7^{3/4}$ и сейсмической активности A_{10} , показывающей уровень сейсмичности. Были менее уверенными оценки вступления участков дуги в стадию форшоков землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ и вероятности землетрясений с $M = 5^{3/4} - 7$. Рассматриваются причины таких отклонений. Обсуждаются способы улучшения методики прогноза. Приведен долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 1986—1990 гг.

Рис. 3, табл. 5, библ. 26 назв.

УДК 551.21.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОВТОРЯЕМОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ. Токарев П. И. «Вулканология и сейсмология», 1987, № 6.

При анализе активности вулканов в качестве основных характеристик извержений предлагается использовать массу изверженного материала, расход магмы и коэффициент эксплозивности, которые в достаточной мере характеризуют величину, интенсивность и характер извержения. По данным об извержениях мира за последние 10 тыс. лет, а также об извержениях Курило-Камчатской зоны за 1901—1980 гг. получено, что между частотой извержений в логарифмическом масштабе и величиной классов извержений существует линейная зависимость.

Рис. 2, табл. 2, библ. 9 назв.